



MINISTÈRE DÉLÉGUÉ AUPRÈS DU PREMIER MINISTRE,
CHARGÉ DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA
PRÉVENTION DES RISQUES TECHNOLOGIQUES ET
NATURELS MAJEURS
SRETIE

document public

**étude du colmatage
et de sa cinétique de formation
à l'interface gravière/nappe**

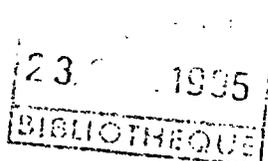


MINISTÈRE DÉLÉGUÉ AUPRÈS DU PREMIER MINISTRE,
CHARGÉ DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA
PRÉVENTION DES RISQUES TECHNOLOGIQUES ET
NATURELS MAJEURS
SRETIE

document public

**étude du colmatage
et de sa cinétique de formation
à l'interface gravière/nappe**

F. Blanchard
M.-P. Keime
M. Lansiait



février 1991
R 32 248

BRGM
SERVICE SOL ET SOUS-SOL
Département Environnement et Risques
B.P. 6009 - 45060 ORLÉANS CEDEX 2 - France - Tél. : (33) 38.64.34.34

SOMMAIRE

	<u>Page</u>
RESUME	7
INTRODUCTION	8
1 - SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	9
1.1. Définition du colmatage	9
1.2. Processus physiques	9
1.3. Processus géochimiques	9
1.4. Processus biochimiques	9
1.5. Conséquences du colmatage	10
2 - PROTOCOLE D'ETUDE	11
2.1. Méthodologie générale	11
2.2. Objectifs visés	11
3 - PRÉSENTATION DU SITE EXPERIMENTAL	13
3.1. Localisation géographique	13
3.2. Contexte local	13
3.3. Contexte hydrogéologique et hydrodynamique	17
3.3.1. les matériaux alluvionnaires et sous-jacents	17
3.3.2. les variations piézométriques entre Loire et nappe	17
3.3.3. les paramètres hydrodynamiques locaux	17
3.4. Contexte biologique	19
4 - HYDRODYNAMIQUE	20
4.1. Objet des mesures	20
4.2. Acquisition des données	20
4.2.1. la Loire	20
4.2.2. la gravière	20
4.2.3. la nappe	21
4.3. Résultats	23
4.3.1. caractéristiques hydrologiques de la Loire	23
4.3.2. évolution du niveau de la lame d'eau de la gravière	26
4.3.3. évolution des niveaux piézométriques de la nappe	27
4.3.4. évolution comparée des hauteurs de la Loire et de la gravière	28

	<u>Page</u>
4.4. Interprétation des résultats	30
4.4.1. influence des conditions météorologiques ..	30
4.4.2. remarques sur la fréquence des observations	30
4.4.3. relativité des hauteurs d'eau Loire/nappe/gravière	30
4.4.4. les réponses hydrologiques à la Loire	34
4.4.5. conclusion	34
5 - QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX	35
5.1. Objet des analyses physico-chimiques	35
5.2. Conditions de prélèvements et sources de données..	35
5.2.1. analyses physico-chimiques prélevées sur le site	35
5.2.2. analyses physico-chimiques de la Loire	36
5.3. Présentation des résultats	37
5.4. Interprétation des résultats	38
5.4.1. remarques	38
5.4.2. pH	41
5.4.3. oxygène dissous	41
5.4.4. minéralisation des eaux	41
5.4.5. substances azotées et phosphorées	50
5.5. Discussion	50
6 - ANALYSES DES SEDIMENTS EN PLACE ET DEPOSES	52
6.1. Objet des mesures	52
6.2. Sédiments immergés au fond de la gravière	52
6.2.1. conditions de prélèvement	52
6.2.2. résultats et interprétation	54
6.3. Sédiments sur berges	54
6.3.1. conditions de prélèvement	54
6.3.2. résultats et commentaires	55
6.4. Pièges à sédiments	59
6.4.1. principe	59
6.4.2. conditions d'analyse	59
6.4.3. résultats et commentaires	61
6.5. Conclusion	61

	<u>Page</u>
7 - ACTIVITES BIOLOGIQUES DE LA GRAVIERE	63
7.1. Objet des recherches	63
7.2. Dispositifs mis en oeuvre	63
7.3. Résultats	63
7.4. Commentaires	63
8 - MISE EN EVIDENCE DU COLMATAGE	65
8.1. Liaison hydrologique entre nappe/gravière/Loire ..	65
8.2. Caractéristiques physico-chimiques	70
8.3. Caractéristiques biologiques	71
8.4. Caractéristiques de la sédimentation	71
CONCLUSION	72
BIBLIOGRAPHIE	73

LISTE DES FIGURES

- Figure 1 : Situation géographique de l'étang de la Tuilerie
- Figure 1 bis : Etang de la Tuilerie, vues en plan (a), en travers (b), en long (c)
- Figure 2 : Coupe lithologique d'un forage de Sandillon
- Figure 3 : Localisation des piézomètres
- Figure 4 : Variation des hauteurs piézométriques de la Loire, de la gravière, du piézomètre sapin, du piézomètre haie
- Figure 5 : Variations des hauteurs piézométriques des piézomètres croisement, haie, bois
- Figure 6 : Débits moyens mensuels de la Loire à Gien en 1988, 1989 et 1990
- Figure 7 : Evolution comparée des hauteurs de la Loire et du niveau de la gravière
- Figure 8 : Schéma des hauteurs relatives de la Loire, de la nappe et de la gravière
- Figure 9 : Détails des réactions de la nappe et de la gravière à la crue du 3/05/1989
- Figure 10 : Détails des variations de la nappe et de la gravière à la crue du 19/02/1990
- Figure 11 : Localisation des points de prélèvements d'eau sur le site
- Figure 12 : Variations de pH
- Figure 13 : Evolutions de l'oxygène dissous
- Figure 14 : Evolutions des bicarbonates
- Figure 15 : Evolutions des chlorures
- Figure 16 : Evolutions des sulfates
- Figure 17 : Evolutions du calcium
- Figure 18 : Evolutions du sodium
- Figure 19 : Evolutions des teneurs en silice
- Figure 20 : Evolutions des teneurs en fer
- Figure 21 : Localisation des prélèvements de sédiments au fond de la gravière

- Figure 22 : Localisation des prélèvements sur berge
- Figure 23 : Localisation des pièges à sédiments et durée de mise en place
- Figure 24 : Mises en évidence des deux périodes de crue
- Figure 25 : Chroniques hydrologiques de la Loire, de la nappe et de la gravière à trois dates différentes lors de la crue de printemps 1989
- Figure 26 : Chroniques hydrologiques de la Loire, de la nappe et de la gravière à trois dates différentes lors de la crue de février 1990

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 1 : Description des piézomètres
- Tableau 2 : Hauteurs maxi, mini, moyennes, amplitude de variations et écart moyen à la Loire de tous les piézomètres relevés du 1/06/1988 au 31/07/1990
- Tableau 3 : Fréquences et localisation des points de prélèvements d'eau
- Tableaux 4 et 4 bis : Résultats des analyses physico-chimiques de la Loire lors de 5 campagnes de prélèvements
- Tableau 5 : Résultats des analyses physico-chimiques au cours des différentes campagnes
- Tableau 6 : Situation hydrologique aux dates d'analyses physico-chimiques
- Tableau 7 : Granulométrie et perte au feu des sédiments au fond de la gravière
- Tableau 8 : Analyse de sédiments sur des profils de la berge Nord
- Tableau 9 : Analyse de sédiments sur des profils de la berge Ouest
- Tableau 10 : Analyse de la perte au feu sur les sédiments des pièges
- Tableau 11 : Qualité des eaux souterraines des forages profonds en calcaire de Beauce.

RESUME

Dans le cadre général de l'influence des gravières sur le régime et la qualité des nappes en vallée alluviale, un protocole d'analyse a été mis en place sur l'étang de la Tuilerie à Sandillon, à 13 km en amont d'Orléans, dans la vallée de la Loire. L'objectif principal de cette contribution est la meilleure connaissance du colmatage de l'interface gravière/nappe. Pour ce faire, plusieurs approches ont été menées : hydrodynamique, physico-chimique, sédimentaire, biologique ; un suivi de février 1988 à septembre 1990 a été réalisé. Les circonstances hydrologiques de sécheresse exceptionnelle n'ont pas permis de faire aboutir tout le plan d'expériences prévues.

Il est néanmoins possible de dégager quelques enseignements :

- Le niveau de la gravière a très peu réagi aux fluctuations piézométriques de la Loire et de la nappe, signe que les échanges nappe/gravière ont été limités pendant la période d'observations. Ceci s'explique par le fait que l'eau de la gravière a été maintenue dans la frange la plus colmatée (fond et bas de berge), sans atteindre une zone active de transfert moins colmatée et correspondant aux hauts des berges.
- Les caractéristiques physico-chimiques des compartiments étudiés confirment l'indépendance relative des différents milieux. La qualité de la nappe s'approche de celle des forages profonds dans le calcaire de Beauce. La gravière est fortement influencée par une activité biologique saisonnière (prolifération de cératophylles aux dépens du phytoplancton).
- L'analyse des sédiments en place précise que le colmatage par des particules fines et organiques est intense au fond de la gravière et sur le bas des berges. La sédimentation de matière organique est plus forte en hiver (dégradation des végétaux aquatiques).
- Sur le plan hydrodynamique, comme physico-chimique, il apparaît que l'influence de la gravière de Sandillon sur la nappe est limitée dans le temps et dans l'espace. Les différences entre nappe amont et aval ne sont pas très significatives. Par contre, la nappe réagit aux fluctuations de la Loire de façon retardée et atténuée avec une vitesse moyenne d'écoulement que l'on peut estimer à 5 ou 6 m/jour en période de crue. Les crues observées n'ont pas eu d'influences significatives sur la gravière.

INTRODUCTION

Les gravières (carrières de granulats alluvionnaires) pénétrant dans les aquifères et constituant ainsi à l'issue de leur exploitation des pièces d'eau artificielles forment actuellement un élément important du paysage français dans les vallées fluviales. Elles ont fait l'objet de divers travaux de recherches concernant l'analyse de leurs relations avec les nappes souterraines environnantes et des impacts réciproques entre les unes et les autres, les caractéristiques et l'évolution des biotopes aquatiques artificiels ainsi créés et leurs utilisations.

A l'initiative du Comité Scientifique "Eau" du Ministère de l'environnement (SRETIE), un groupe de travail a, sur la base d'une analyse bibliographique, fait le point des connaissances et dégagé les principaux sujets sur lesquels les recherches devraient permettre de mieux insérer les gravières dans l'environnement et de mieux en tirer partie après leur phase d'exploitation.

La synthèse bibliographique a notamment montré que la connaissance des relations hydrodynamiques entre les gravières en eau et les nappes souterraines était assez avancée. Par contre, des inconnues et des difficultés d'investigation subsistaient au plan de la cinétique de ces échanges et du rôle du vecteur EAU entre les gravières et les aquifères encaissants, plus particulièrement au niveau des interfaces. Ce sont donc les processus de colmatage et de décolmatage qui restent à préciser. Les berges jouent-elles un effet "filtre", "barrière", "piégeage" ou "relargage" ?

C'est dans ce cadre global de réflexion que la présente étude trouve sa finalité.

Cette étude se propose, en effet, de contribuer à la détermination de la nature et de la cinétique du colmatage des berges de la gravière, à l'interface gravière/nappe, dans un but général d'améliorer les connaissances des impacts des gravières sur les ressources en eaux souterraines.

Les deux premiers chapitres permettent de faire le point sur les connaissances bibliographiques du colmatage et de présenter la méthodologie générale retenue. Le chapitre suivant permet de décrire les conditions générales du site. Les autres chapitres traitent des différents paramètres analysés, en exposant le protocole expérimental ou d'analyse, les résultats et leur interprétation. La synthèse des résultats permet de mettre en évidence les principaux enseignements de l'étude, les réserves et les investigations supplémentaires restant à faire.

1 - SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. Définition

Le colmatage est un ensemble de phénomènes qui conduisent à une diminution de la perméabilité de la matrice solide du terrain au voisinage de l'eau superficielle et de l'eau souterraine.

Cette frange colmatée, outre son effet de filtration mécanique, induit des processus géochimiques et biologiques susceptibles d'interférer sur la qualité de l'eau de la nappe.

1.2. Processus physiques

Le blocage des pores du matériau en place par des particules en suspension est un mécanisme lié à la dimension relative pore-particules. La sédimentation a lieu pour toutes les particules dont le diamètre moyen dépasse 30 μm . Les particules s'insèrent dans le milieu poreux à travers les fissures. Les particules plus fines sont retenues par des effets électriques de surface (colloïde), par des effets de voûte, ou par inertie.

1.3. Processus géochimiques

Plusieurs processus majeurs peuvent être responsables de la rétention plus ou moins longue de certains éléments.

Les supports solides jouent un rôle absorbant. Ce phénomène est augmenté par la présence d'argiles, de matières organiques, d'oxyde de fer ou de manganèse, des carbonates et des silicates. La capacité d'échange cationique est très variable selon la composition du support solide. Des processus variés de précipitation/dissolution, de formation de complexes dissous ou de floculation-coagulation peuvent intervenir dans cette frange colmatée.

1.4. Processus biochimiques

La frange colmatée située à l'interface gravière/nappe alluviale constitue une zone particulière d'un aquifère alluvionnaire. Certains processus peuvent prendre plus d'importance que dans le reste de l'aquifère, du fait de la fonction d'interface de cette zone. Le transfert de l'oxygène utilisé par les micro-organismes pour minéraliser les matières organiques, sources d'énergie, va provoquer le développement d'une zone réduite, en particulier dans la frange colmatée où sont présentes de nombreuses bactéries. Cette zone réduite se caractérise par :

- l'absence d'oxygène dissous,
- une diminution de la teneur en matières organiques,
- une baisse de pH,
- la réduction des nitrates et des sulfates.

Certaines études montrent que cette zone s'étend sur 50 à 75 cm à partir de la berge. Au-delà de cette limite, l'activité bactérienne décroît à cause de la diminution de matières oxydables. L'extension latérale de la zone réduite est fonction de la présence ou de l'absence de niveaux imperméables rendant l'aquifère captif.

La plupart des bactéries jouant un rôle dans ces processus ont des propriétés colloïdales. Elles s'attachent aux surfaces des solides où sont fixés cations, protéines et autres molécules organiques. Leur développement en masse conduit à un colmatage en profondeur. Les bactéries qui interviennent sont celles du cycle de l'azote, du soufre, du cycle de fer et du manganèse.

1.5. Conséquences du colmatage

Les incidences du colmatage sur les échanges gravière/nappe alluviale sont de plusieurs types :

- conséquences hydrologiques : modification des échanges, décalage des écoulements, variations saisonnières des échanges, blocage des échanges, individualisation de la gravière ;
- conséquences sur la qualité des eaux : variations de facteurs physico-chimiques des eaux de la gravière, incidence sur la qualité des eaux de la nappe.

Ces différentes conséquences sont variables selon les conditions hydrogéologiques du site, selon les qualités physico-chimiques des eaux du cours d'eau et de la nappe

2 - PROTOCOLE D'ETUDE

2.1. Méthodologie générale

Le plan de recherche vise à contribuer à la compréhension du colmatage à partir de relevés et d'expérimentations sur un site d'étude ; il ne s'agit que d'une contribution par le fait que les résultats obtenus sont toujours dépendants du site sur lequel l'expérimentation a lieu et des conditions hydrologiques pendant la période des relevés.

Pour s'affranchir des comportements spécifiques d'un cas particulier, une autre approche pouvait être l'interprétation statistique de données existantes sur de nombreuses gravières en situations différentes. Mais les interprétations de données hétérogènes recueillies pour des objectifs divers rendent la comparaison des données entre elles assez délicate.

Un des paramètres qui a guidé le choix d'un site d'étude est la fluctuation annuelle du niveau de la nappe et de la gravière, de l'ordre de quelques mètres. Ceci présente de nombreux avantages tant sur le plan du phénomène de colmatage que sur le plan pratique par accès aux sédiments ou mise en place d'expérimentations à certaines périodes de l'année.

2.2. Objectifs visés

La méthodologie générale étant retenue, le plan d'expérience doit répondre à plusieurs objectifs :

- hydrodynamique :

Suivre les variations des niveaux piézométriques relatifs au cours d'eau, à la nappe et à la gravière, selon des relevés bimensuels d'échelle limnique sur une durée totale de 2 ans, et par l'intermédiaire d'un module enregistreur de type MADO, pour la lame d'eau de la gravière.

- mesures physico-chimiques de l'eau :

Connaître et suivre l'évolution de la qualité physico-chimique de l'eau de la rivière, de la nappe et de la gravière pour quatre saisons représentatives.

- nature et composition des sédiments :

- . identifier les composants sédimentés à des profondeurs et des distances variables de la berge ;
- . suivre la nature et la quantité des éléments sédimentés sur une période donnée (pièges à sédiments, zone décapée).

- Biologie :

Estimer la productivité biologique de la gravière afin d'évaluer la phase organique contribuant au colmatage.

L'interprétation des données acquises devra permettre de déterminer la nature du colmatage, sa cinétique de formation en relation avec l'hydrodynamique du système gravière-nappe et avec la production "biologique" primaire.

3 - PRESENTATION DU SITE EXPERIMENTAL

3.1. Localisation géographique

La gravière en eau appelée "Etang de la Tuilerie" se situe dans la vallée de la Loire, sur le territoire communal de Sandillon (Loiret), à environ 13 kilomètres en amont de la ville d'Orléans (voir figure 1 : situation géographique de l'étang de la Tuilerie, à 1/25 000).

L'exploitant a laissé cette gravière en eau depuis son exploitation, sans réaménagement particulier. L'étang, de propriété communale, est actuellement loué pour la pêche.

3.2. Contexte local

La gravière s'inscrit globalement dans une forme rectangle de 350 m x 200 m. Il n'y a pas d'autres gravières dans un rayon de 1,5 km. La distance à la Loire (milieu gravière à milieu Loire) est de 350 m environ. Une levée de digue s'interpose entre la Loire et la gravière (environ 6 m au-dessus du niveau moyen de la Loire).

Les schémas qui suivent précisent la situation locale de la gravière par rapport à la Loire, ainsi que les profils en long et en travers de l'étang de la Tuilerie (voir figure 1 bis : Etang de la Tuilerie, vues en plan (a), en travers (b), en long (c)).

Les photos 1, 2 et 3 montrent le paysage général autour de la gravière à différentes périodes de l'année.

*Etude du colmatage et de sa cinétique de formation à l'interface
gravière/nappe - SRETIE*

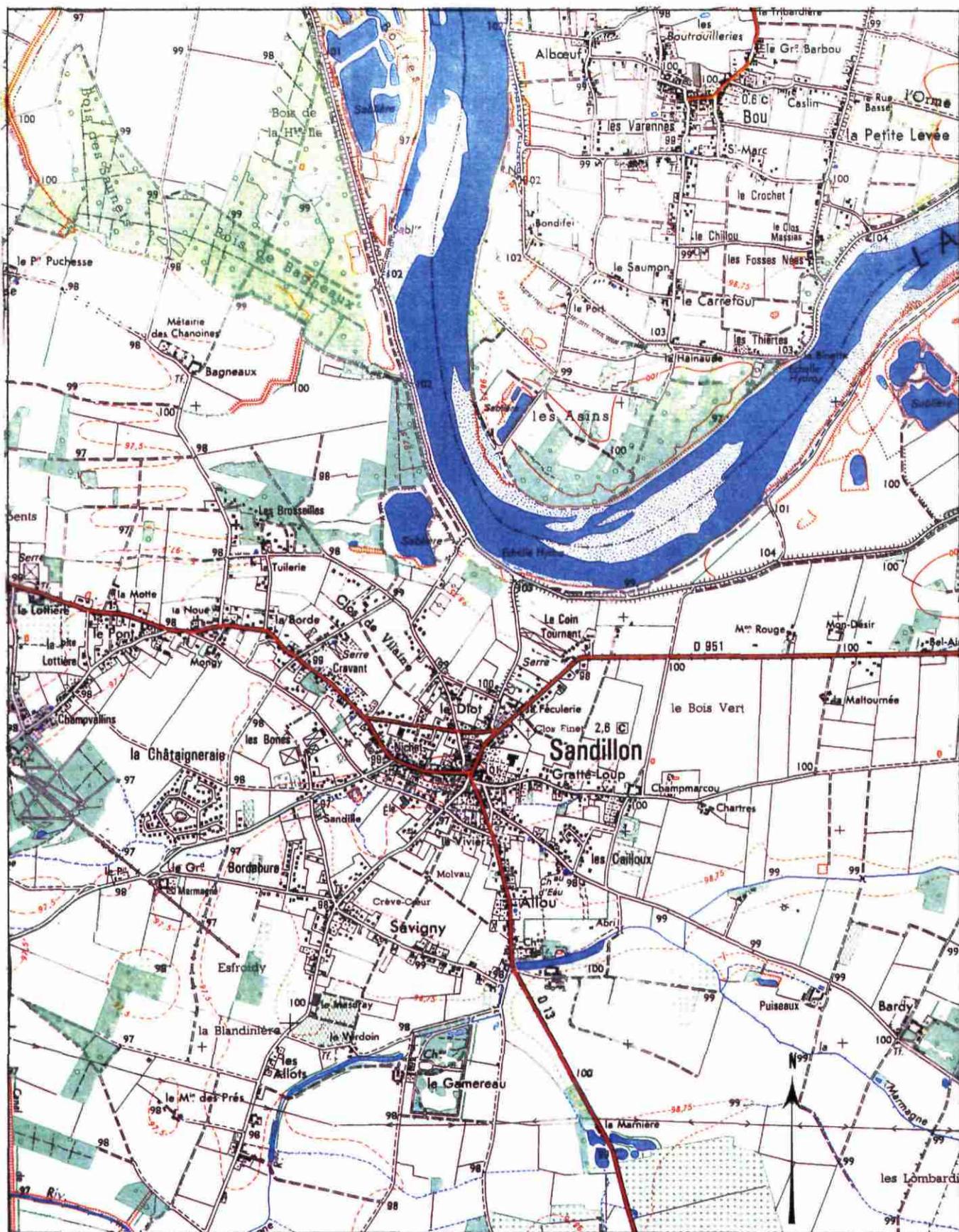


Figure 1 : Situation géographique de l'étang de la Tuilerie
(1/25 000)

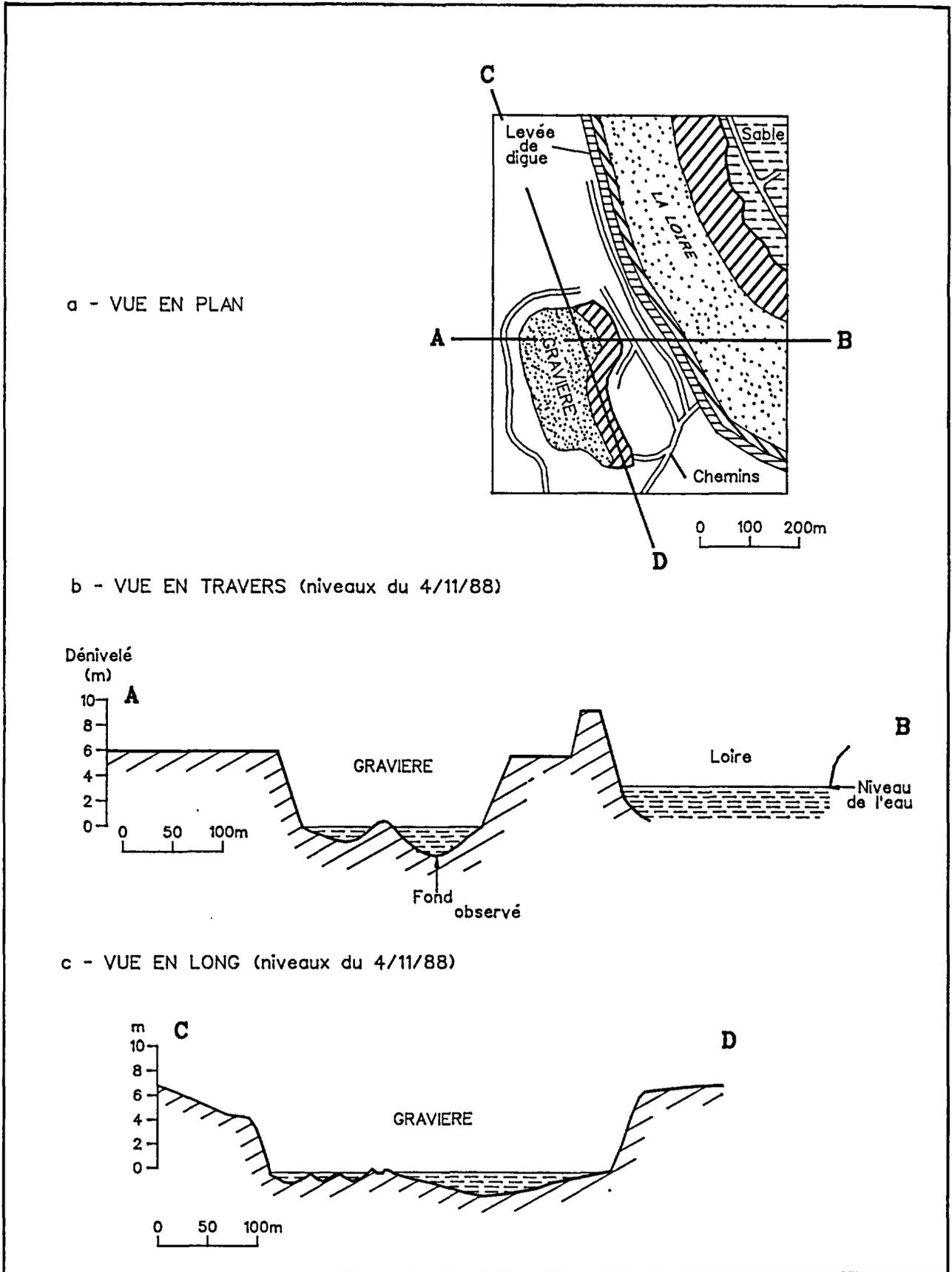


Figure 1 bis : Etang de la Tuilerie



photo -1-

Vue générale de la gravière pendant la période de sécheresse

1- piézomètre croisement - 2- piézomètre sapin - 3- piézomètre bout - 4- zone de décapage expérimentale



photo -2-

Vue partielle de la gravière en moyennes eaux

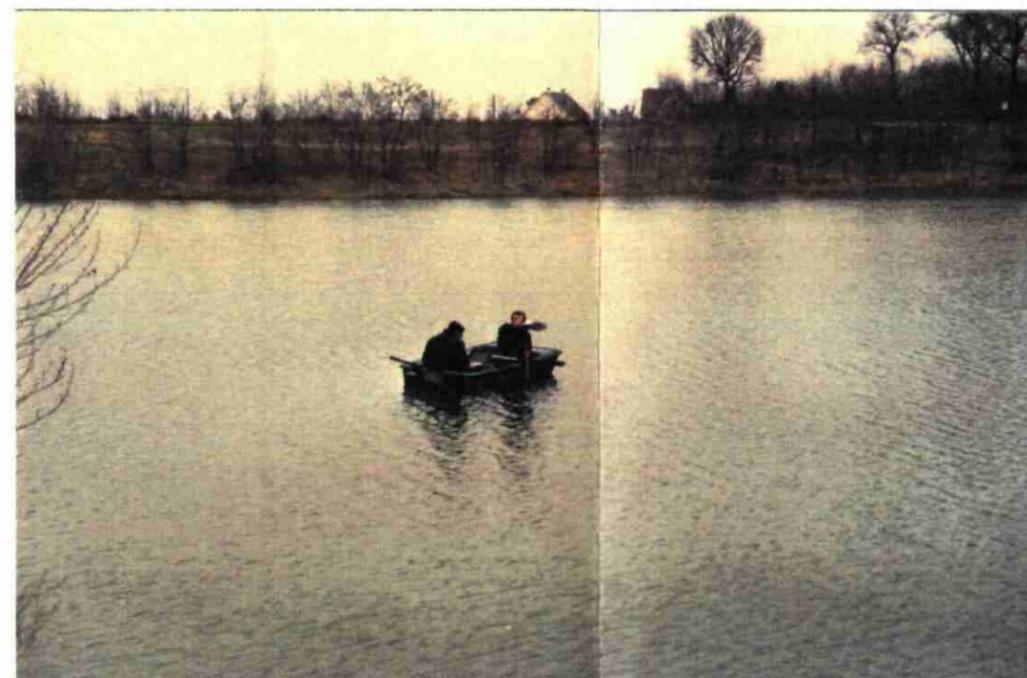


photo -3-

Gravière en pleines eaux, installation du module
des enregistrements des variations de niveaux en continu (MADO)

3.3. Contexte hydrogéologique et hydrodynamique

3.3.1. Les matériaux alluvionnaires et sous-jacents

- les alluvions quaternaires : elles représentent une formation relativement superficielle (environ 6 m) composée de sables et de graviers ;
- les calcaires de Beauce : forment le substratum calcaire plus perméable que les alluvions sus-jacentes.

Ces deux aquifères ont des relations complexes dues à des différences de perméabilité. Par endroit, une couche marneuse sépare les alluvions quaternaires des calcaires de Beauce. Les communications entre calcaire et alluvions se font ponctuellement à la faveur des effondrements dus à l'évolution karstique (voir figure 2 : coupe lithologique d'un forage à Sandillon).

3.3.2. Les variations piézométriques entre Loire et nappe

La surface piézométrique entre Châteauneuf-sur-Loire et Sandillon est toujours à une cote inférieure à celle de la Loire (1,8 à 2,5 m).

La recharge est rapide mais il n'y a pas d'augmentation durable des réserves. L'eau transite dans les calcaires de Beauce sous-jacents. Les fluctuations entre la nappe et la Loire sont légèrement déphasées ; la nappe est en avance sur la Loire en période d'étiage, et en retard en période de crue.

3.3.3. Les paramètres hydrodynamiques locaux

La diffusivité de la nappe est voisine de $1 \text{ m}^2/\text{s}$. Des variations locales traduisent l'existence de zones relativement imperméables, de zones de colmatage des berges ou une indépendance locale de la nappe alluviale par rapport à la nappe sous-jacente.

La transmissivité du réservoir alluvial est comprise entre 0,01 et 0,03 m^2/s .

Le coefficient d'emmagasinement serait de l'ordre de 1 à 3 % (chiffres tirés de l'étude hydrogéologique du Val d'Orléans, BRGM, mars 1970).

*Etude du colmatage et de sa cinétique de formation à l'interface
gravière/nappe - SRETIE*

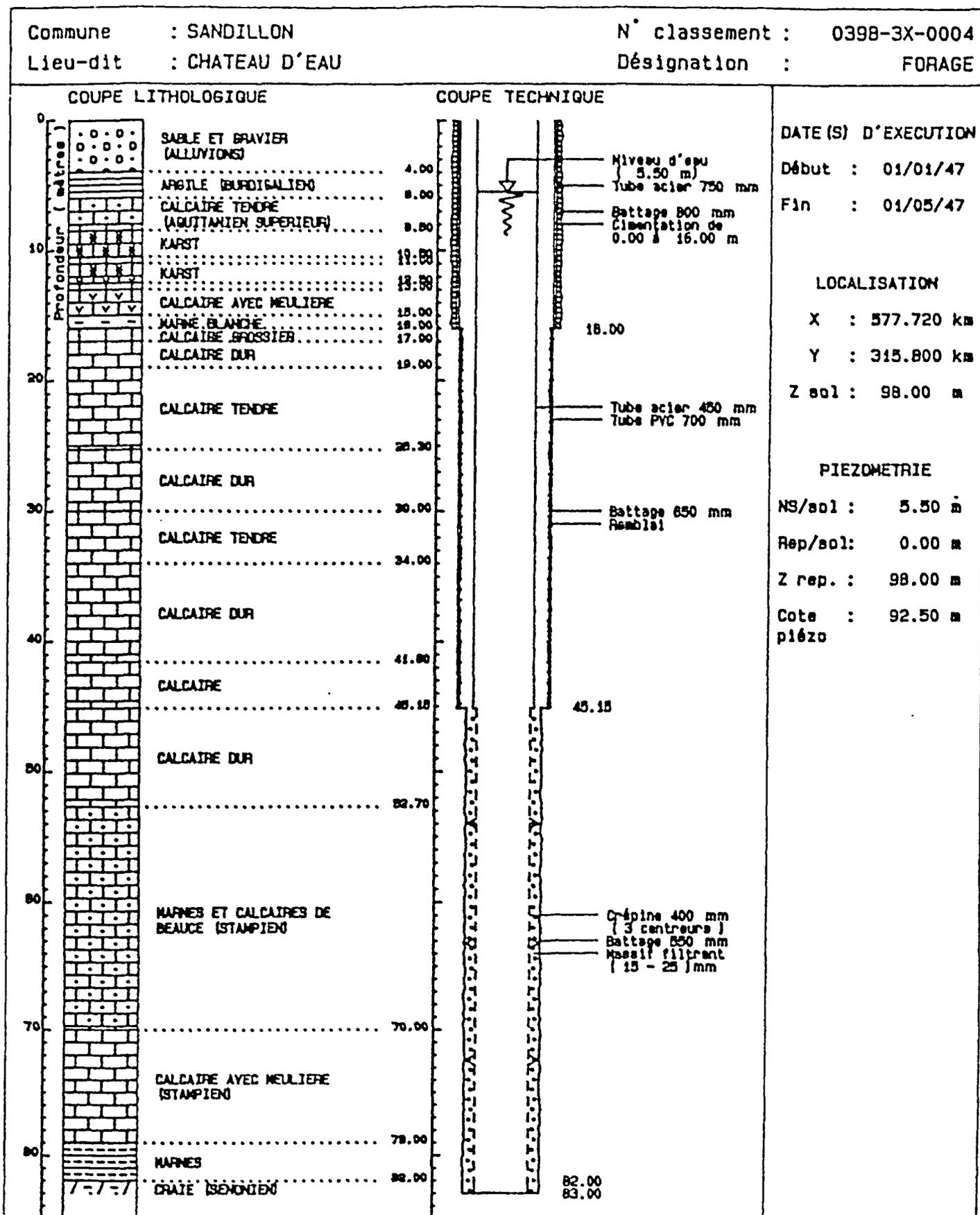


Figure 2 : Coupe lithologique d'un forage à Sandillon

3.3.4. Les variations physico-chimiques

Il existe une différence de minéralisation entre la nappe alluviale et celle des calcaires. Une dilution de la nappe alluviale s'observe lors des passages des crues. Par contre, une minéralisation peut apparaître à l'étiage lorsque la nappe réagit à un apport d'impluvium local.

Les variations de la température des eaux traduisent l'influence de la Loire. A Sandillon, les effets de la Loire sur la température de l'eau de la nappe sont retardés et d'amplitude moyenne (5,5 à 7°C) contrairement à d'autres secteurs où les amplitudes peuvent atteindre 15°C ou au contraire 2,5°C.

3.4. Contexte biologique

Comme toutes les gravières, l'étang de la Tuilerie est un biotope aquatique artificiellement créé, qui s'est colonisé spontanément par les peuplements animaux et végétaux, aquatiques ou terrestres. De plus, il a été empoissonné pour les activités de pêche.

L'évolution globale du système est très étroitement liée aux phénomènes hydriques et sédimentologiques du milieu. Un peuplement végétal composé essentiellement de cératophylles, potamots et élodées, très dense colonise l'étang en été.

4 - HYDRODYNAMIQUE

4.1. Objet des mesures

Le suivi des hauteurs piézométriques, pendant toute la durée de l'étude permet d'analyser les chroniques piézométriques, d'en déduire les interactions entre les différents systèmes étudiés (Loire, gravière, nappe) et de contribuer à la description des phénomènes de colmatage.

4.2. Acquisition des données

Les données recueillies concernent trois milieux :

4.2.1. La Loire

Les hauteurs de la Loire sont relevées journalièrement et recueillies par le Service Hydrologique Centralisateur du Bassin Loire-Bretagne. L'échelle limnigraphique la plus proche se situe au niveau du pont Georges V (années 1988 et 1990), ou au quai du Roi (année 1989) à Orléans. Ces points ont servi de référence pour déterminer les hauteurs de la Loire à Sandillon, située à 13,9 km (et respectivement à 12,9 km) en amont d'Orléans. La lame d'eau de la Loire à Sandillon est supérieure de 4,6 m (et respectivement 4,3 m) par rapport à celle d'Orléans.

Pour cette étude, nous disposons donc de l'ensemble des hauteurs journalières des années 1988, 1989 et 1990 de la Loire à Orléans. Les valeurs retenues pour Sandillon sont ramenées aux cotes IGN et corrigées de la pente moyenne de 3,3‰.

4.2.2. La gravière

Le niveau piézométrique de la gravière a été suivi de deux manières :

- Un module enregistreur MADO, capteur de pression, a enregistré toutes les 12 heures les variations de la hauteur d'eau par mesure de la pression. Mis en place le 18/02/1988, le module a du être remplacé par une échelle limnigraphique dès septembre 1988. Deux raisons à cela :
 - . le colmatage par les matières en suspension,
 - . la sécheresse ayant mis hors d'eau le dispositif.
- Une échelle limnigraphique a été mise en place en septembre 1988. Là aussi, la baisse importante du niveau de la gravière a nécessité la mise en place d'une deuxième échelle. Celles-ci ont été relevées à la même fréquence que les piézomètres installés sur le site.

4.2.3. La nappe

Des piézomètres installés autour de la gravière (voir figure 3) permettent de suivre l'évolution des hauteurs de la nappe en amont, en aval et latéralement à la gravière, et selon le sens présumé d'alimentation de la nappe.

Pour ce faire, trois piézomètres ont été installés en juin 1988 à environ 5 m de profondeur (piézomètre champ, bout et sapin). Ce premier dispositif a été complété par un deuxième dispositif de piézomètres plus profonds, à 10 m, installés en octobre 1988.

N°	Nom du piézomètre	Situation	Profondeur	Date de mise en place
1	SAPIN	amont	5 - 6 m	juin 1988
2	BOUT	latérale	5 - 6 m	juin 1988
3	CROISEMENT	latérale	10 m	octobre 1988
4	BOIS	latérale	10 m	octobre 1988
5	CHAMP	aval	5 - 6 m	juin 1988
6	HAIE	aval	10 m	octobre 1988

Tableau 1 : Description des piézomètres

Des relevés ont été effectués de juin 1988 à juillet 1990, selon une fréquence moyenne de un relevé toutes les deux semaines.

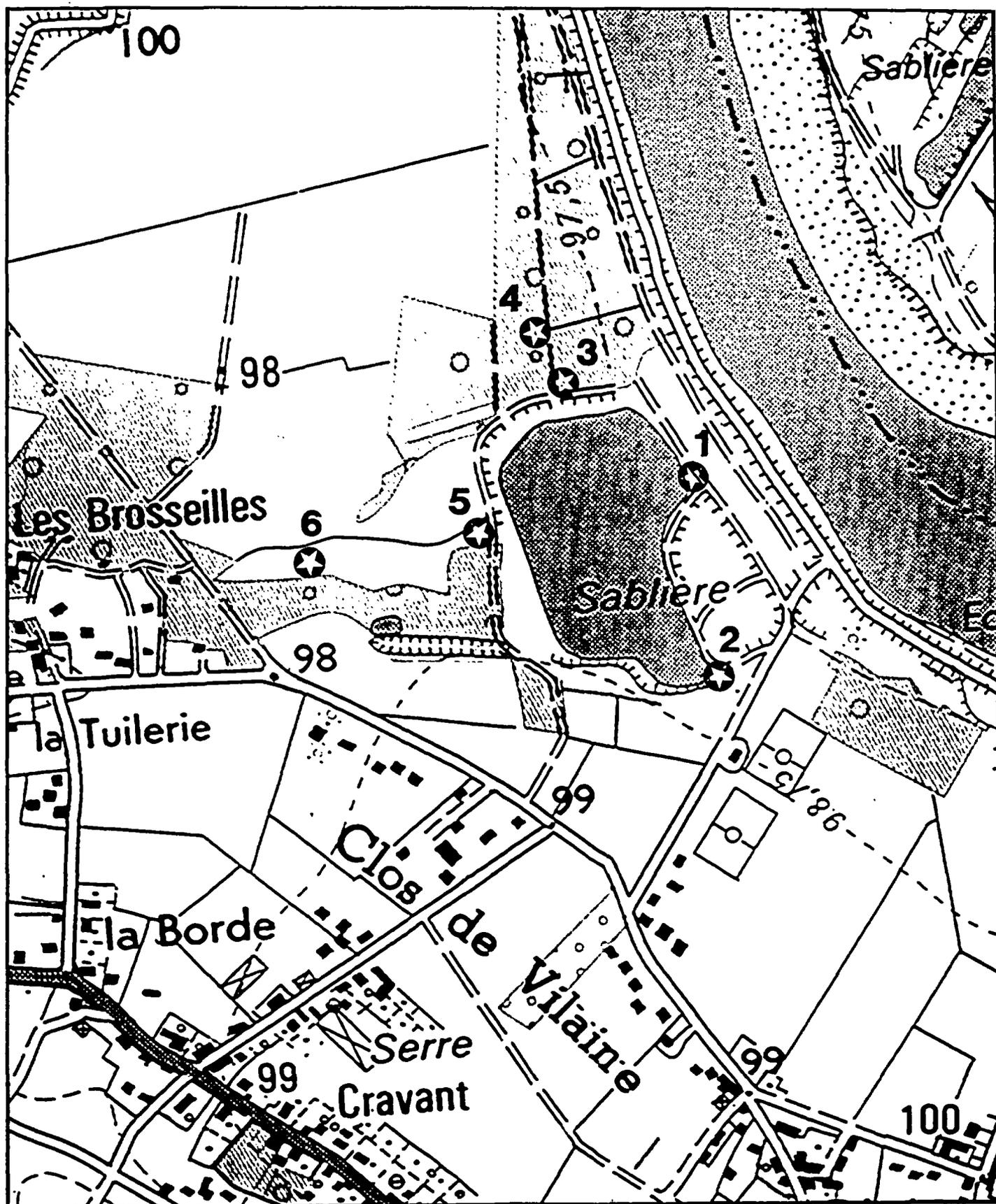


Figure 3 : Localisation des piézomètres

4.3. Résultats

Toutes les données recueillies en valeurs brutes lues ont été transcrites en cotes IGN (1969) de manière à visualiser les évolutions des hauteurs piézométriques relatives à la Loire, à la gravière et à la nappe.

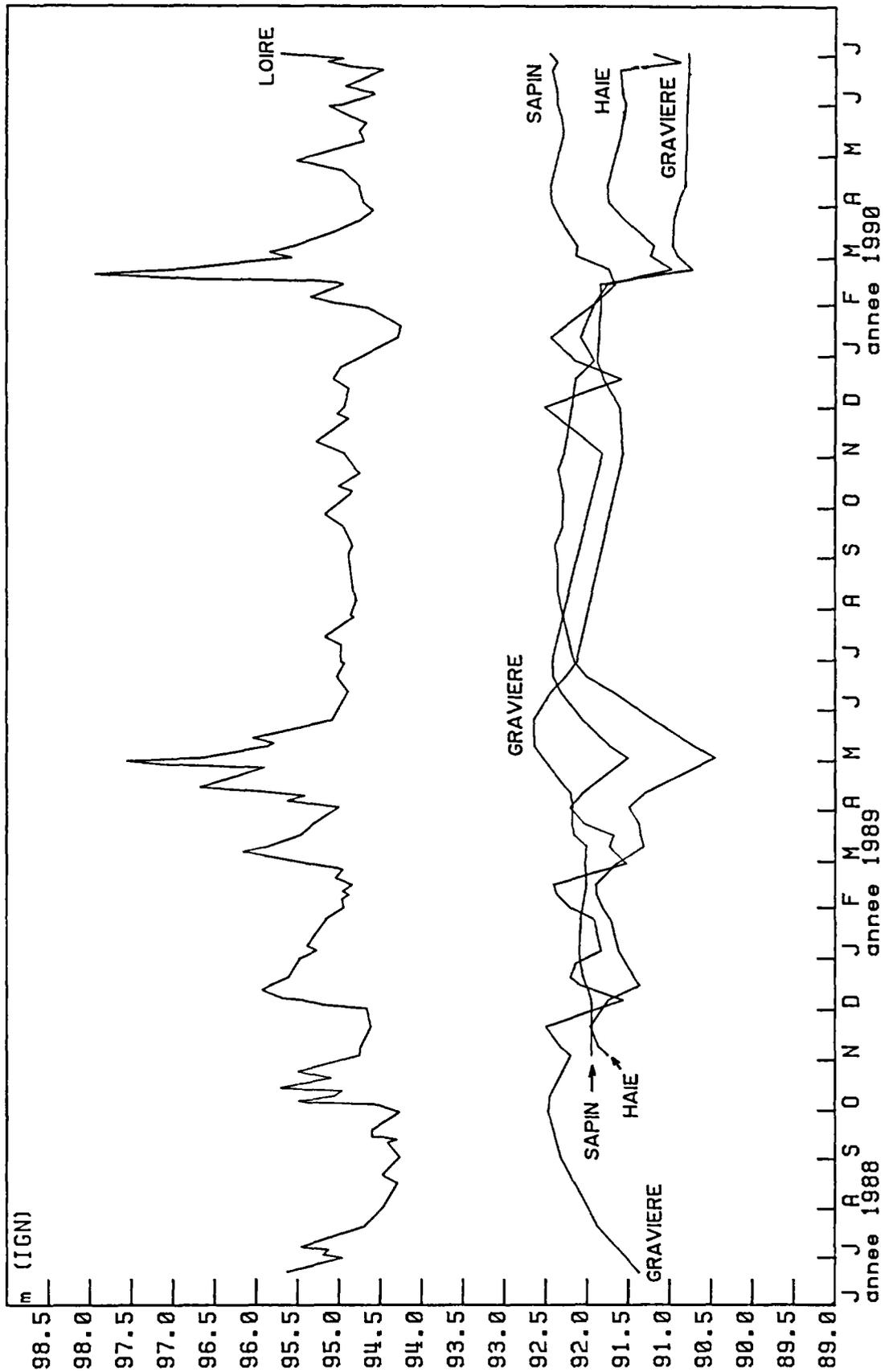
L'ensemble des données est visualisé à travers des graphiques, qui par superposition donnent une bonne image des variations des hauteurs piézométriques sur 2 ans, et les réponses aux variations hydrologiques de la Loire (voir figures 4 et 5).

4.3.1. Caractéristiques hydrologiques de la Loire

La station hydrométrique de Gien a été retenue pour déterminer les débits caractéristiques de la Loire dans la traversée du département du Loiret. En basses et moyennes eaux, les débits sont un peu plus faibles à Orléans, du fait des pertes de la Loire en aval de Sully, dans le substratum karstique. Depuis plusieurs années, le soutien à l'étiage est assuré dès que le débit atteint environ 60 m³/s à Gien.

Les chiffres suivants donnent toutefois un ordre de grandeur des débits de crues et d'étiage sur la Loire :

- débit de crue de retour 2 ans	1.900 m ³ /s
- débit de crue de retour 5 ans	2.600 m ³ /s
- débit de crue de retour 10 ans	3.000 m ³ /s
- débit de crue de retour 20 ans	3.600 m ³ /s
- débit de crue de retour 50 ans	4.500 m ³ /s
- débit d'étiage décennal naturel	25 m ³ /s
- débit d'étiage décennal soutenu (30 jours consécutifs)	60 m ³ /s
- débit moyen annuel (module) à Gien (calculé pour la période 1936-1980)	350 m ³ /s



ETANG DE LA TUILERIE - SANDILLON

Figure 4 : Variations des hauteurs piézométriques de la Loire, de la
gravière, du piézomètre Sapin et Haie

*Etude du colmatage et de sa cinétique de formation à l'interface
gravière/nappe - SRETIE*

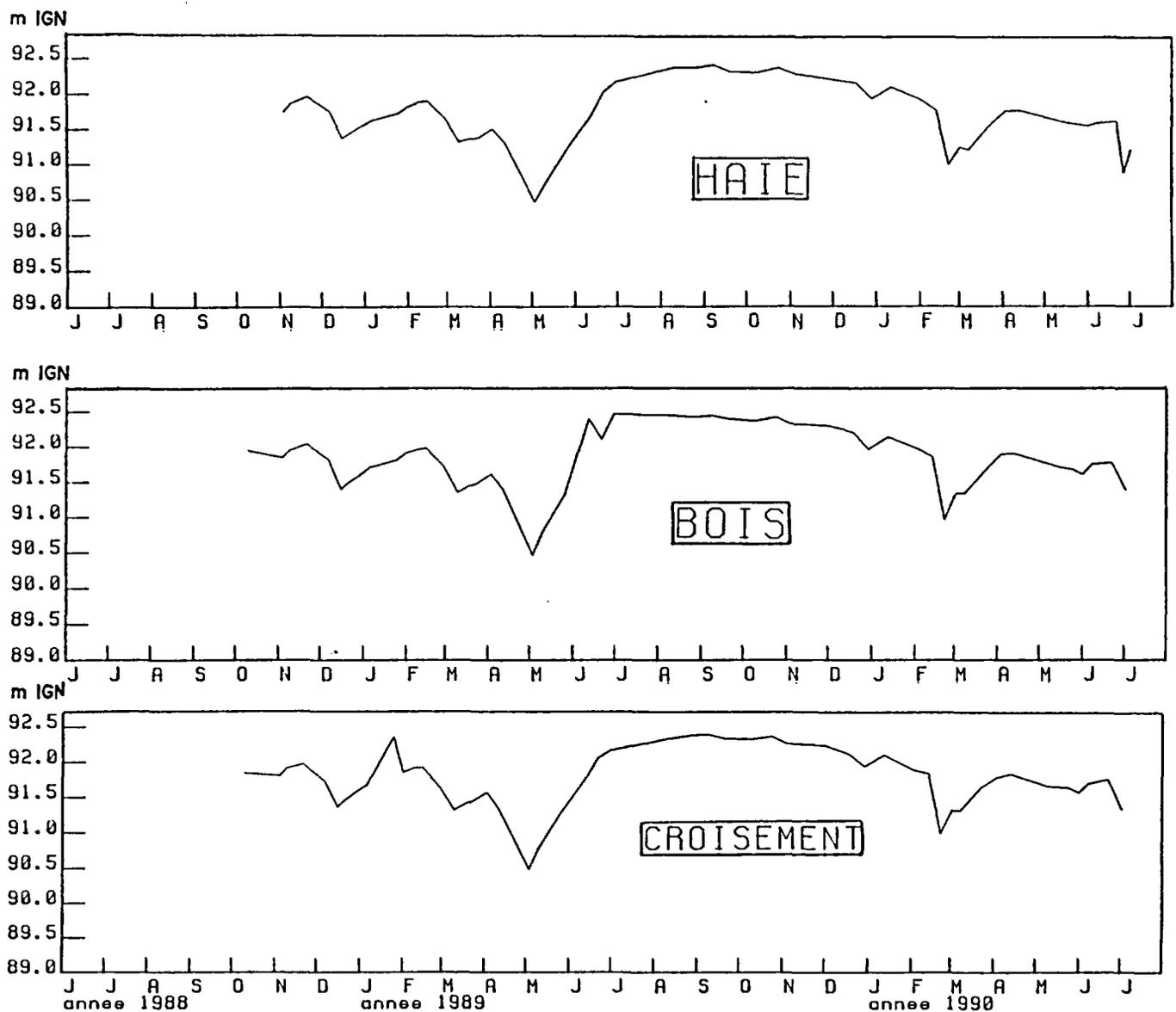


Figure 5 : Variations des hauteurs piézométriques des piézomètres
haie, croisement et bois

La période d'observation (1/06/1988 au 31/07/1990) correspond très nettement à une période de sécheresse. Le graphique suivant montre que les moyennes mensuelles et annuelles sont presque toujours inférieures au module interannuel et souvent très voisines du débit d'étiage décennal soutenu.

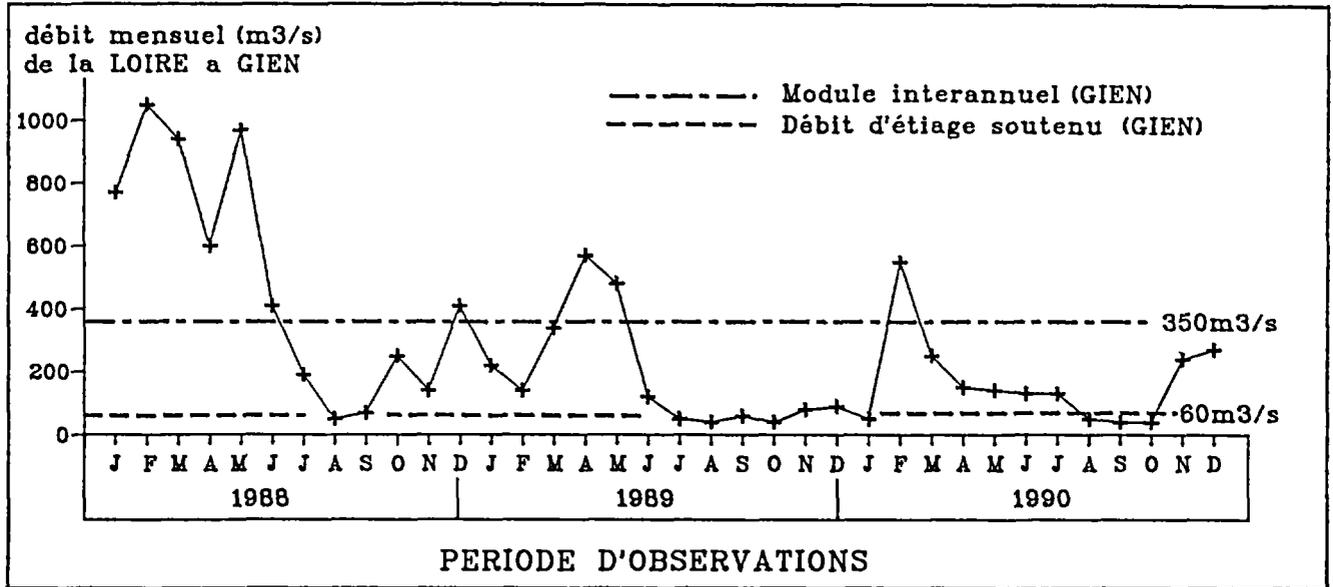


Figure 6 : Débits moyens mensuels de la Loire à Gien en 1988, 1989 et 1990

La crue d'avril-mai 1989 intervient après des variations de débit d'amplitudes assez modérées, mais dont le niveau n'atteint pas le module interannuel. La crue de février 1990 intervient par contre dans une phase de sécheresse longue de plus de 6 mois. Elle est très localisée dans le temps (17/02/1990 au 21/04/1990). La figure 5 montre les variations des hauteurs piézométriques journalières de la Loire à Sandillon (cote IGN 1969).

Les différents pics traduisent des crues ponctuelles. Le deuxième semestre 1989 présente des hauteurs soutenues artificiellement pour maintenir un débit d'étiage décennal sur 30 jours consécutifs.

4.3.2. Evolution du niveau de la lame d'eau de la gravière

Le niveau de la gravière présente une relative constance jusqu'en février 1990. Une légère augmentation du niveau, correspondant à mai 1989, coïncide avec la crue du 28 avril au 4 mai 1989 enregistrée sur la Loire. Un phénomène particulier s'observe lors du relevé du 22 février 1990 puisque le niveau de la gravière chute brutalement au même titre que les piézomètres environnants, et ceci, pendant une période de crue brutale et rapide dont la pointe est le 19 février 1990. Le niveau de la gravière restera bas tandis que celui de la nappe augmentera.

4.3.3. Evolution des niveaux piézométriques de la nappe

Quatre des six piézomètres ont pu être relevés régulièrement. Les piézomètres en aval (haie) et latéraux (croisement, bois) présentent des niveaux et des variations très semblables. Ils traduisent le fait que la gravière semble peu influencer les niveaux de la nappe à plus de 200 m en aval.

Le piézomètre Sapin en amont de la gravière présente des niveaux et des évolutions différentes des autres piézomètres.

L'amplitude de variation maximale est de 1 mètre contrairement aux autres piézomètres dont l'amplitude est double (1,91 m à 2 m) et à celle de la Loire qui atteint, sur la période étudiée, 3,68 m (voir tableau 2).

	Cote maxi (m IGN)	Cote mini (m IGN)	Moyenne (m IGN)	Amplitude de varia- tion (m)	Ecart moyen par rapport à la Loire (m)
LOIRE	97,93	94,25	95,17	3,68 m	0
GRAVIERE	92,65	90,70	91,83	1,91 m	- 3,34 m
SAPIN	92,52	91,51	92,12	1,01 m	- 3,05 m
HAIE	92,4	90,49	91,76	1,91 m	- 3,41 m
BOIS	92,47	90,47	91,82	2,00 m	- 3,35 m
CROISEMENT	92,40	90,49	91,76	1,91 m	- 3,41 m

Tableau 2 : Hauteurs maxi, mini, moyennes, amplitude de variations et écart moyen à la Loire de tous les piézomètres relevés du 1/06/1988 au 31/07/1990

Le niveau de la nappe en amont de la gravière varie beaucoup plus par rapport à la nappe aval et par rapport au niveau de la gravière, semblant répondre rapidement, mais de façon modérée, aux fluctuations de la Loire. Le niveau de la nappe amont se trouve généralement au-dessus du niveau des autres piézomètres, excepté pour la période de sécheresse stable de juillet 1989 à février 1990. Les inter-relations entre Sapin (amont) et gravière sont un peu plus complexes. Le niveau de la gravière varie très lentement et se retrouve tantôt au-dessous, tantôt au-dessus du niveau de la nappe amont jusqu'en juillet 1989. A partir de cette date, correspondant à l'intensification de la sécheresse, la nappe amont est toujours plus haute que la gravière.

4.3.4. Evolution comparée des hauteurs de la Loire et de la gravière

Le module enregistreur MADO a permis d'enregistrer les hauteurs d'eau de la gravière en deux mesures par jour, du 18/02/1988 au 3/08/1988. Ces données sont à comparer aux hauteurs journalières de la Loire (voir figure 7 : Evolution comparée des hauteurs de la Loire et du niveau de la gravière).

Pendant les 7 mois d'observations, la Loire a globalement diminué la hauteur de sa lame d'eau, accusant un pic important (+ 2,5 m) mais ponctuel fin mars, et une crue plus étalée et moins prononcée en mai (+ 1 m).

Parallèlement à cette évolution, la gravière présente des hauteurs d'eau maximales d'avril à juin. La hauteur d'eau diminue ensuite progressivement (- 1,6 m), de façon assez comparable à la Loire, sans retranscrire les fluctuations de hauteurs enregistrées sur la Loire. Ceci indique que le transfert d'eau de la Loire à la gravière est limité, voire annulé, résultat d'une interaction possible du colmatage des berges de la Loire et de la gravière et d'une recharge de la nappe des calcaires par la Loire.

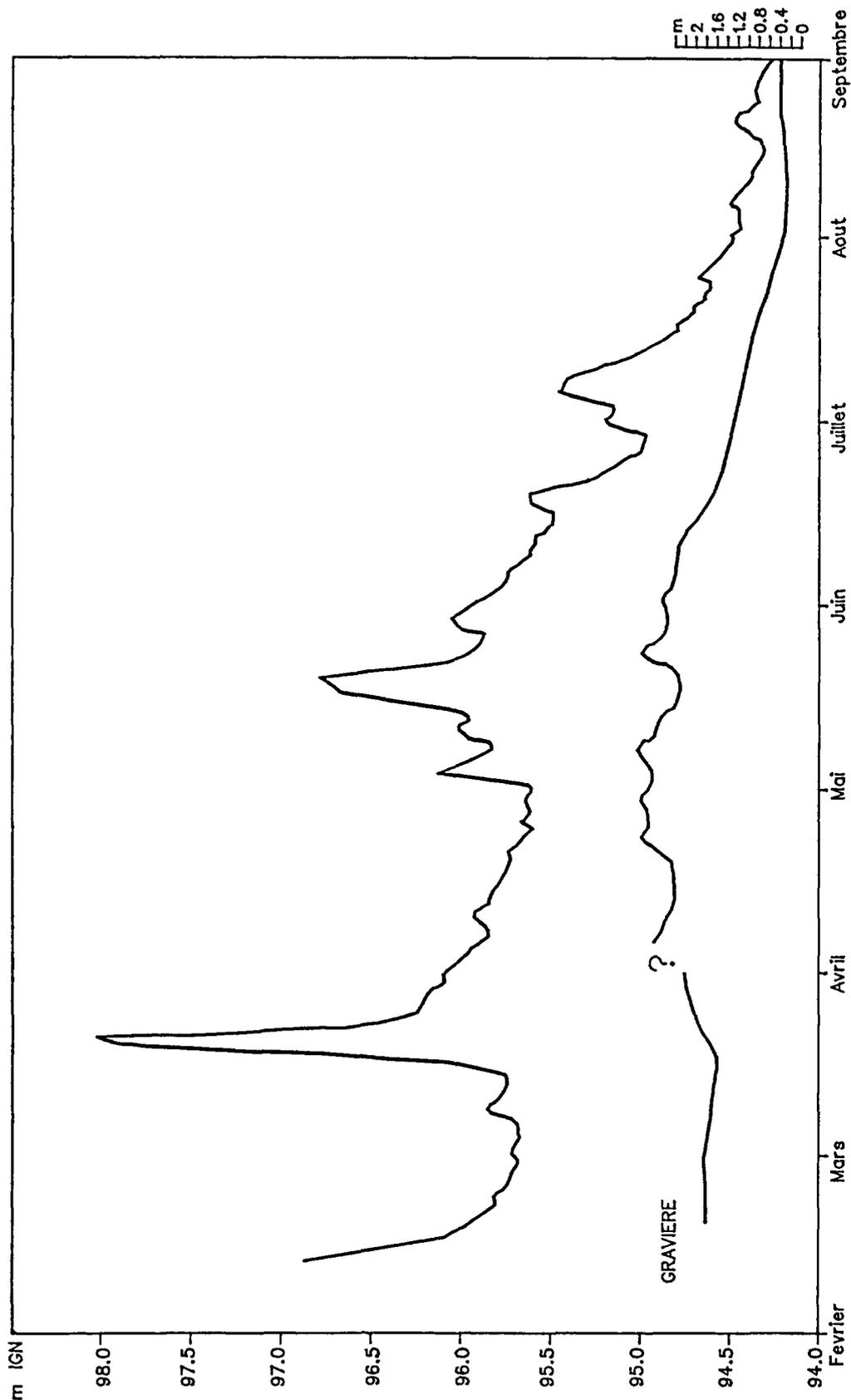


Figure 7 : Evolution comparée des hauteurs de la Loire et du niveau
de la gravière, de février à septembre 1988

4.4. Interprétation des résultats

4.4.1. Influence des conditions météorologiques

La durée de l'étude se caractérise par une période de sécheresse qui débute à l'automne 1988 et se poursuit jusqu'à la fin de l'étude. La Loire retranscrit ce phénomène par des hauteurs (ou des débits) bien inférieures à la moyenne et proches des hauteurs d'étiage décennal (soutenu). Seules, quelques "petites" crues se distinguent. Par exemple, les plus fortes hauteurs sont observées en février 1990 et correspondent à une crue de fréquence de retour 2 ans.

Ces conditions météorologiques assez exceptionnelles ont fait échouer quelques observations : piézomètres à sec, module enregistreur hors d'eau, très faible hauteur d'eau dans la gravière, etc.

On peut supposer également que les conditions de sécheresse (sol, sous-sol) ont joué un rôle non négligeable dans les transferts d'eau pouvant retarder ou minimiser l'influence du cours d'eau sur les niveaux respectifs de la gravière et de la nappe. La complexité des relations entre la nappe dans les alluvions et dans les calcaires de Beauce peut contribuer à l'explication de certains phénomènes particuliers.

4.4.2. Remarques sur la fréquence des observations

La fréquence des relevés sur le site étant en moyenne de 15 jours (1 semaine à 3 semaines), il est certain que certaines situations maximales ou minimales n'ont pas pu être enregistrées par les mesures. En effet, la Loire, pour qui des données journalières existent, peut connaître des variations importantes de débit en quelques heures, et d'autant plus en une dizaine de jours.

Ce décalage de pas d'observations peut donc atténuer ou masquer certaines réponses de la gravière ou de la nappe au passage d'une crue ou au passage de tout autre phénomène hydrologique.

4.4.3. Relativité des hauteurs d'eau entre la Loire, la nappe et la gravière

- La lame d'eau de la Loire est toujours nettement supérieure à celle des deux autres compartiments, en moyenne de 3,7 m ; ce décalage est plus prononcé que ne le précisait la bibliographie. Cela est sans doute dû à la période de sécheresse induisant un abaissement général des nappes.
- La surface piézométrique de la nappe, latéralement et en aval de la gravière est assez proche de la lame d'eau de la gravière mais les variations de la gravière ne sont pas synchrones avec la nappe et de plus faible amplitude.

Ceci tendrait à montrer que la gravière n'est pas entièrement isolée des autres systèmes aquatiques mais qu'un colmatage existe et est responsable du retard ou de l'écrêtement des phénomènes hydrologiques de la Loire sur la gravière (le colmatage des berges de la Loire et la traversée de la digue peuvent également contribuer à l'explication de ce phénomène).

- La surface piézométrique de la nappe amont (entre la Loire et la gravière) est en moyenne plus haute que la nappe aval et l'amplitude de ses variations est faible. Il est en effet logique que l'alimentation de la nappe par la Loire se traduise par le schéma simplifié suivant :

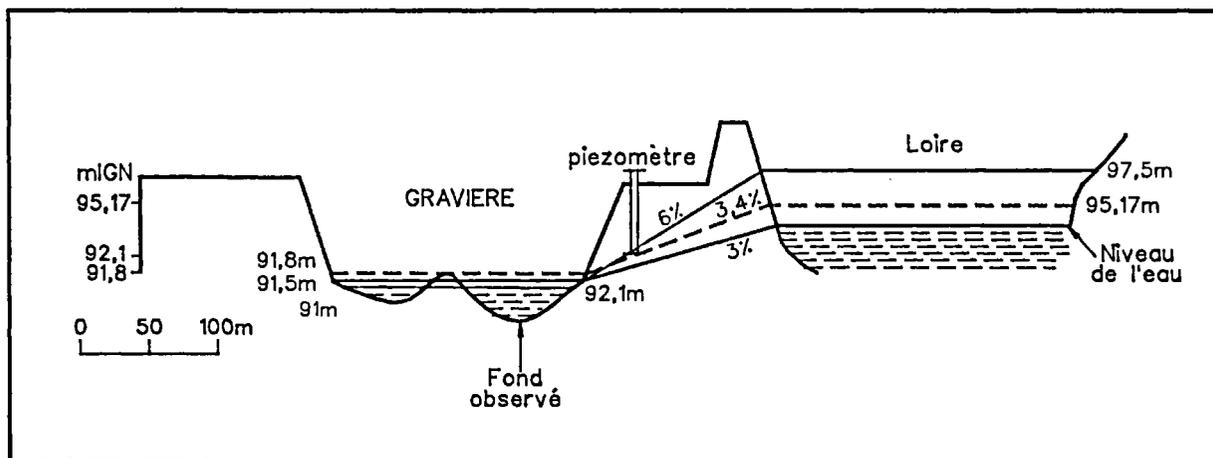


Figure 8 : Schéma des hauteurs relatives moyennes et en crue de la Loire, de la nappe et de la gravière

A d'autres périodes (avant juillet 1989), le niveau de la gravière est au-dessus de toute surface piézométrique de la nappe amont ou aval. Ce phénomène peut être expliqué par deux hypothèses :

- bonne alimentation de la gravière par la Loire et mauvaise restitution de la gravière à la nappe dues à un faible et respectivement un fort colmatage des berges (rôle tampon de la gravière) ;
- une alimentation extérieure à la Loire (flux d'orage en provenance de l'agglomération de Sandillon).

4.4.4. Les réponses hydrologiques à la Loire

Les fluctuations des hauteurs piézométriques de la nappe, de la gravière et de la Loire sont assez délicates à interpréter du fait de l'absence de corrélations très évidentes.

Lors du passage des deux crues, les plus importantes pendant la période d'observations (3/05/1989 et 19/02/1990), on constate que :

- la recharge de la nappe (même amont) n'est pas immédiate ;
- l'élévation de la surface piézométrique est lente et s'étale sur une période de 40 à 45 jours ;
- les hauteurs de la Loire variant de 2,5 m en 35 jours, les piézomètres Sapin et Haie ne varient que de 0,8 m (cruée du 19/02/1990), sur environ 45 jours ;
- la gravière n'a pas de réaction caractéristique : en mai 1989, l'élévation de hauteur est presque synchrone à la crue (influence des pluies locales) ; en mars 1990, le temps de réponse supposée est très tardif, plus de deux mois (absence de pluies locales, crue en amont).

Lors du passage de pointe d'étiage sur la Loire, le temps de réponse de la nappe varie de 30 à 35 jours (voir figures 9 et 10). Là aussi, la réponse de la gravière n'est pas caractéristique.

Pendant la période de sécheresse de juillet 1989 à février 1990, la nappe aval conserve un niveau assez constant, alors que la nappe amont et la gravière présentent une diminution progressive de leurs niveaux.

4.4.5. Conclusion

Plusieurs points se dégagent des analyses piézométriques :

- la gravière semble avoir un comportement assez indépendant de la Loire et de la nappe : ceci argumentant la présence d'un colmatage sur les berges et au fond de la gravière ;
- la nappe réagit aux fluctuations de la Loire, de façon atténuée et avec un retard de 30 à 45 jours : ceci s'expliquant par la perméabilité du milieu de transfert, par la présence possible de franges colmatées des berges de la Loire, et par l'interférence avec la circulation de l'eau dans les calcaires ;
- la pente, entre les surfaces piézométriques de la Loire à la gravière, varie de 3 % à 6 %.

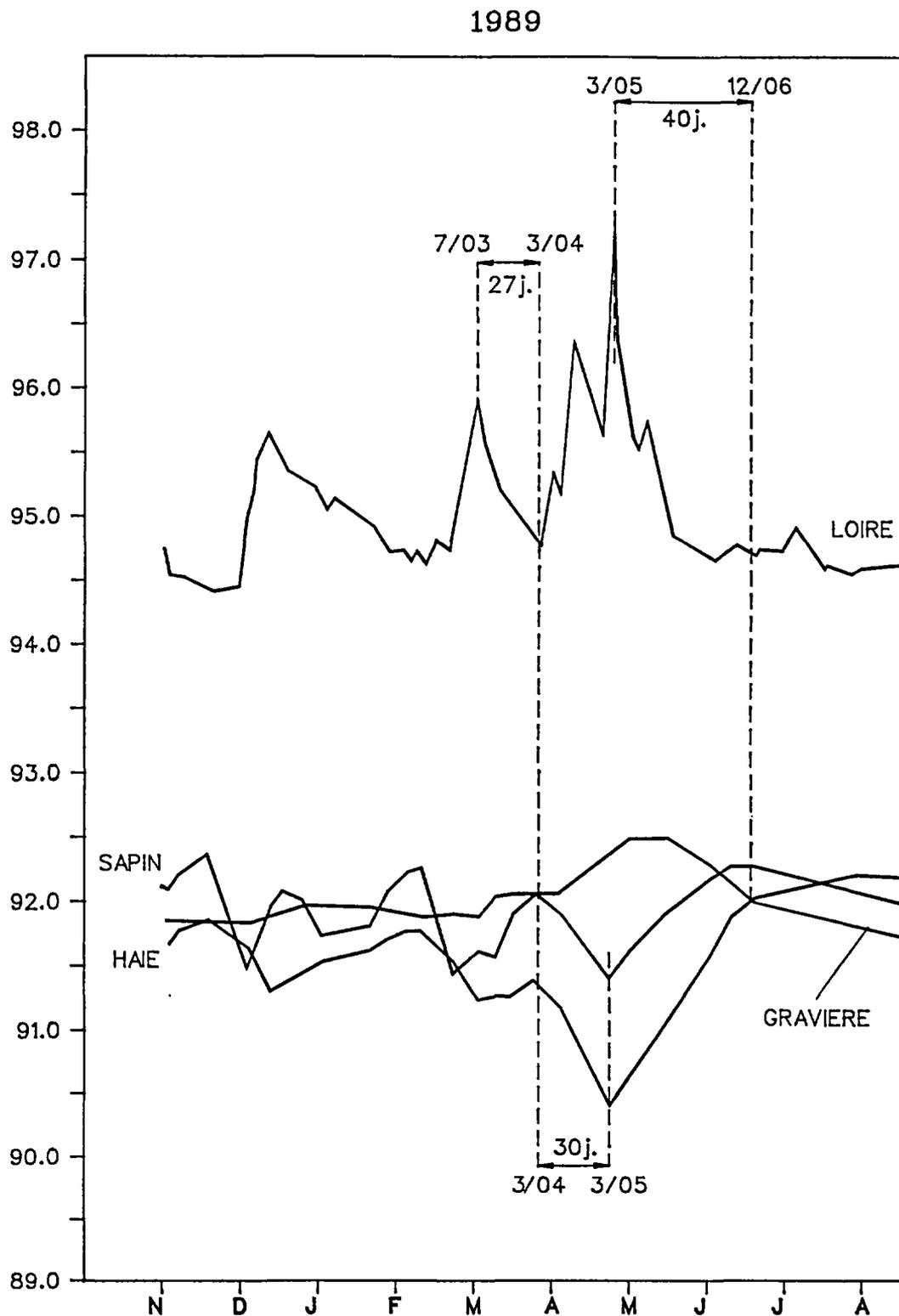


Figure 9 : Détails des réactions de la nappe et de la gravière
à la crue du 3/05/1989

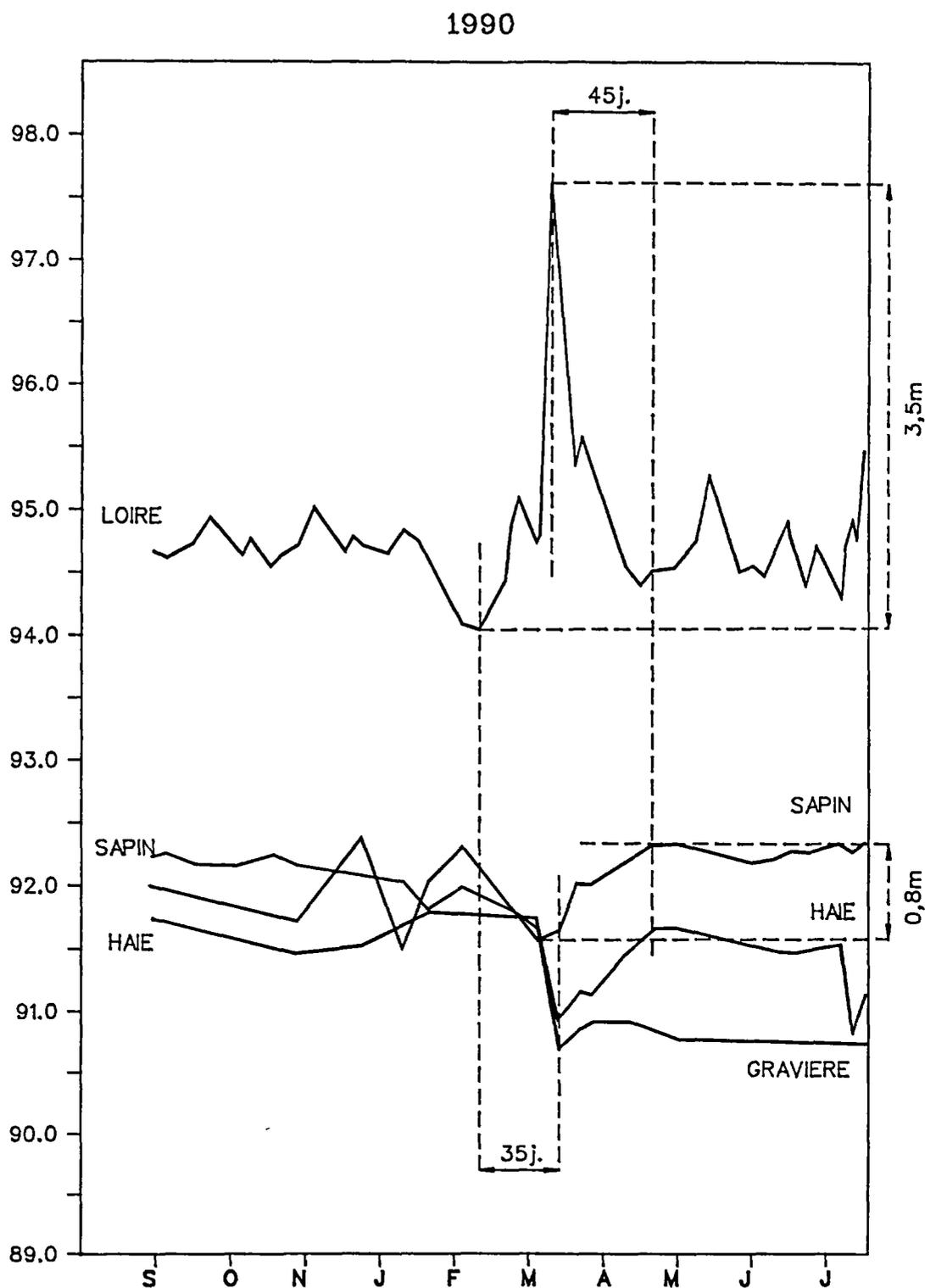


Figure 10 : Détails des réactions de la nappe et de la gravière
à la crue du 19/02/1990

5 - QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX

5.1. Objet des analyses physico-chimiques

Les données sur la qualité physico-chimique des eaux de la Loire, de la gravière et de la nappe doivent permettre de répondre à plusieurs objectifs :

- comparer, à un instant donné, la qualité des eaux entre les différents "compartiments" aquatiques étudiés ;
- suivre l'évolution saisonnière de la qualité des eaux de ces mêmes systèmes ;
- déterminer l'influence de la gravière sur la qualité des eaux de la nappe ;
- expliquer l'incidence du colmatage par les paramètres physico-chimiques.

5.2. Conditions de prélèvements et sources de données

5.2.1. Analyses physico-chimiques prélevées sur le site

Le tableau 3 et la figure 11 ci-après précisent les dates et lieux de prélèvements d'échantillons sur le site.

date de prélèvement	02/1988	08/1988	01/1989	03/1989	09/1989
Localisation					
Gravière	Gravière 1 Gravière 2	Gravière	Gravière 1 Gravière 2		
Piézo. aval	Piézo. 5 CHAMP				Piézo. 6 HAIE
Piézo. amont	Piézo. 1 SAPIN	Piézo. 1 SAPIN		Piézo. 1 SAPIN	
Piézo. latéral	Piézo. 2 BOUT	Piézo. 2 BOUT		Piézo. 4 BOIS	Piézo. 3 CROISEMENT

Tableau 3 : Fréquence et localisation des points de prélèvements d'eau

COURS D'EAU POINT	LOIRE 050500	Commune Département Localisation	ORLEANS 45 STATION DE MESURE - QUAI DU ROI
Police des eaux Nature du cours d'eau Surface bassin amont (km2) Catégorie piscicole Pente moyenne Distance aux sources		036966 2 0,9	Bassin Code hydrologique Point Kilométrique (pK) Altitude Nature géol. du lit Nature géol. régionale
			LOIRE-BRETAGNE K43500 00633 0102

Date de prélèvement Heure de prélèvement Prélèvement effectué Organisme ordonnateur	15/02/88 15 H 00 Pt Principal En surface 020	01/08/88 15 H 00 Pt Principal En surface 020	16/01/89 15 H 00 Pt Principal En surface 020	06/09/89 15 H 00 Pt Principal En surface 020	06/03/89 15 H 00 Pt Principal En surface 020
Seuil Prélèvement effectué Aspect des abords Hydrocarbures Mousses (détergents) Bois, feuilles Boues surnageantes Autres corps surnageants Couleur de l'eau Aspect de l'eau Odeur de l'eau Importance de l'ombre Météo Durée prélèvement	MILIEU COURANT PROPRE ABSENT (V.) PRESENT (V.) ABSENT (V.) ABSENT (V.) ABSENT (V.) TRES COLORE TROUBLE SANS ABSENTE SEC ENSOLEILLE	SALE ABSENT (V.) PRESENT (V.) ABSENT (V.) ABSENT (V.) ABSENT (V.) TRES COLORE TROUBLE SANS ABSENTE ORAGE	PROPRE PRESENT (V.) PRESENT (V.) ABSENT (V.) ABSENT (V.) ABSENT (V.) LEG. COLORE TROUBLE SANS ABSENTE HUMIDE	AVAL SEUIL MILIEU COURANT SALE ABSENT (V.) ABSENT (V.) ABSENT (V.) ABSENT (V.) PRESENT (V.) TRES COLORE TROUBLE LEGERE ABSENTE SEC ENSOLEILLE	PROPRE ABSENT (V.) PRESENT (V.) PRESENT (V.) PRESENT (V.) PRESENT (V.) ABSENT (V.) TRES COLORE TROUBLE SANS ABSENTE SEC ENSOLEILLE
Débit m3/s Nature du débit Estimation du débit	1.71+03 INSTANT. STA. LIMNI.	102.000 INSTANT. STA. LIMNI.	211.000 INSTANT. STA. LIMNI.	53.500 INSTANT. STA. LIMNI.	595.000 INSTANT. STA. LIMNI.
Pression atmosphérique mb Température de l'air °C Turbidité Formazine FTU Turbidité Jackson gouttes Température eau °C pH u pH Conductivité 20°C µS/cm Mat en suspension mg/l Perte au feu mg/l Oxygène dissous mg/l Taux de saturation O2 % DBO5 à 20°C mg/l DCO mg/l O2 Oxyd KMnO4H froid mg/l O2 Limite visibilité cm Calcium mg/l Magnésium mg/l Sodium mg/l	1010 8,2 6,2 8,50 150 64 11,6 94 3,5 16 4,4 28 3,0	1010 26,5 24,5 9,00 200 45 10,6 128 8,0 30 4,6 24 5,7 12,4	1020 3,0 6,4 7,70 241 8 1,0 1,9 32 5,0	1010 23,5 19,6 8,30 235 44 11,0 3,8 25 6,2 17,6	1000 19,5 132 10,2 7,50 200 56 3,4 3,5 33 4,0 7,8

Tableau 4 : Résultats des analyses physico-chimiques de la Loire
lors des 5 campagnes de prélèvements

COURS D'EAU POINT	LOIRE 050500	Commune Département Localisation	ORLEANS 45 STATION DE MESURE - QUAI DU ROI
Police des eaux Nature du cours d'eau Surface bassin amont (km2) 036966 Catégorie piscicole 2 Pente moyenne 0,9 Distance aux sources		Bassin LOIRE-BRETAGNE Code hydrologique K43500 Point Kilométrique (pK) 00633 Altitude 0102 Nature géol. du lit Nature géol. régionale	

Date de prélèvement Heure de prélèvement Prélèvement effectué	15/02/88 15 H 00 Pt Principal En surface	01/08/88 15 H 00 Pt Principal En surface	16/01/89 15 H 00 Pt Principal En surface	06/09/89 15 H 00 Pt Principal En surface	06/03/89 15 H 00 Pt Principal En surface
Organisme donneur	020	020	020	020	020
Potassium mg/l		4,0		4,2	3,8
Ammonium mg/l	0,040	0,068	0,058	< 0,010	0,065
Chlorures mg/l		15,5		18,8	11,5
Sulfates mg/l		20,0		23,6	18,6
Bicarbonates mg/l	79	65	100	87	94
Nitrite mg/l	0,06	0,04	0,05	> 0,01	0,08
Nitrate mg/l	11,00	1,10	11,30	> 0,50	13,20
Orthophosphate mg/l	0,320	0,080	0,400	> 0,050	0,340
Titre hydrométrique °f					
T alcalin complet (TAC)*f					
Phosphore total mg/l	0,25	0,22	0,20	0,22	0,35
Bore mg/l	> 0,025	< 0,050		0,013	0,100
Chlorophylle a mg/m3	0,00	87,40		104,00	35,50
Phéopigments mg/m3	9,78	41,80		25,40	23,70
Calcium/Magnésium					
Méthode mesure pigments					
Année mesure pigments aa					
Date mesure pigments jjj				20	11
Mat Volatiles Suspens mg/l	9	16			
Ammonium total (en N) mg/l	0,03	0,05	0,05		0,05
Nitrite (en N) mg/l	0,02	0,01	0,02		0,02
Nitrate (en N) mg/l	2,48	0,25	2,55		2,98
Orthophosphate (en P) mg/l	0,1040	0,0261	0,1310		0,1110
Arsenic mg/l		0,005		0,005	> 0,005
Cadmium mg/l		< 0,001		< 0,001	< 0,001
Chrome total mg/l		< 0,100		< 0,050	< 0,050
Cyanures totaux mg/l		< 0,010		< 0,010	< 0,010
Cuivre mg/l		< 0,020		< 0,020	< 0,020
Fluor mg/l		0,450		< 0,050	0,170
Fer total mg/l		0,200		< 0,150	1,000
Mercurc mg/l		< 0,0005		< 0,0005	< 0,0005
Manganèse mg/l		0,070		0,080	0,040
Plomb mg/l		< 0,002		< 0,002	< 0,002
Sélénium mg/l		< 0,010		< 0,010	< 0,010
Zinc mg/l		< 0,020		< 0,020	< 0,020
Déterg anioniques mg/l		< 0,025		< 0,025	< 0,025
Composés phénoliques mg/l		< 0,025		< 0,025	< 0,025

Etude du colmatage et de sa cinétique de formation à l'interface
Gravière/nappe - SRETIE

Tableau 4 bis : Résultats des analyses physico-chimiques de la Loire
lors des 5 campagnes de prélèvements

Date d'analyse	19 Février 1988						5 Août 1988			
	Loire	piézo.1 (sapin)	gravière 1	gravière 2	piézo.5 (champ)	Piézo.2 (bout)	Loire	piézo.1 (sapin)	gravière	piézo.2 (bout)
Paramètres mesurés										
pH	8,5	7	8	8	6,95	8,85	9	7,3	7,6	7,3
Conductivité (µS)	150	579	-	-	-	-	200	579	137	409
O2 dissous (mg/l)	11,6	-	11,3	11,6	-	-	10,6	2,4	0,2	1,2
Anions		-2,19	-2,53	-2,56	-5,16	-2,18	-	-6,96	-1,54	-4,76
Cations		2,09	2,46	2,46	4,90	2,08	-	6,63	1,52	4,54
SiO2 (mg/l)		10	2	2	14	4	-	19	0,6	18
Ca ⁺ (mg/l)	28	26	32	32	62,5	28	24	75	13	59
Mg ⁺ (mg/l)	3	7	7	7	14	5,5	5,7	16	6,2	14,5
Na ⁺ (mg/l)		4,5	5,5	5,5	12,5	3	12,4	16	7,3	6
K ⁺ (mg/l)		1	2	2	3,5	4	4	34,2	1,7	4
HCO3 ⁻ (mg/l)	79	104	125	125	247	104	65	295	64	269
Cl ⁻ (mg/l)		6,8	7,7	9,7	16	4,9	15,5	22	8,4	6,2
SO4 ²⁻ (mg/l)		12,4	12,4	12	30	15,6	20	65	11,9	7,5
Fe (ppb)		123	13	19	39	213	200	40	60	1400
Mn (ppb)		30	5	6	37	33	70	620	< 5	1140
NO3 ⁻ (mg/l)	11	2,1	< 0,1	< 0,1	1,1	< 0,1	1,1	4,7	< 0,1	< 0,1
NO2 ⁻ (mg/l)	0,06	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,04	2,7	< 0,01	< 0,01
PO4 (mg/l)	0,32	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,08	< 0,1	< 0,1	< 0,1
NH4 ⁻ (mg/l)	0,04	-	-	-	-	-	0,068	-	-	-

Tableau 5a : Résultats des analyses physico-chimiques au cours
des différentes campagnes

5 Janvier 1989			Date d'analyse	13 Mars 1989			Septembre 1989			
Loire	gravière 1	gravière 2	Localisation	Loire	piézo.1 (sapin)	piézo.4 (bois)	Loire	Etang	Piézo.3 (croisem.)	piézo.6 (haie)
<u>Paramètres mesurés</u>										
7,7	8	8,1	pH	7,5	7,8	7,9	9,3	7,3	7	7,3
241	185	187	Conductivité (µS)	200	426	418	235	-	-	-
18	2,2	2,2	O2 dissous (mg/l)	-	2,2	3,7	10	4,3	< 0,2	< 0,2
-	-2,15	-2,15	Anions	-	-5,02	-5	-	-1,96	-6,42	-4,41
-	2,10	2,13	Cations	-	5,22	5,25	-	1,86	6,59	4,61
-	0,5	0,6	SiO2 (mg/l)	-	24,4	19,3	-	2	29	32
32	24,2	24,2	Ca ⁺ (mg/l)	29	63,4	72	25	21	95	73
5	7,3	7,5	Mg ⁺ (mg/l)	4,2	17,1	12,5	6,2	4	17,5	8,8
-	6,7	6,8	Na ⁺ (mg/l)	-	14,1	11,1	17,6	10	8,3	5
-	< 0,3	0,5	K ⁺ (mg/l)	3,8	1,4	5,9	4,2	2	1,8	1
100	101	101	HCO3 ⁻ (mg/l)	94	233	270	87	66	360	212
-	8,4	8,3	Cl ⁻ (mg/l)	11,5	25,5	7,8	18,8	148	9,8	9,6
-	12,5	12,3	SO4 ²⁻ (mg/l)	18,6	22,2	15,8	23,6	18	11,5	15,3
-	24	26	Fe (ppb)	1000	< 20	160	150	20	40	20
-	< 5	< 5	Mn (ppb)	40	< 5	186	80	< 5	912	< 5
11,3	< 0,1	< 0,1	NO3 ⁻ (mg/l)	13,2	1	1	< 0,5	0,3	< 0,1	20,5
0,05	< 0,01	< 0,01	NO2 ⁻ (mg/l)	0,08	0,16	< 0,01	< 0,01	0,03	< 0,1	0,06
0,4	< 0,1	< 0,1	PO4 (mg/l)	0,34	0,3	< 0,1	< 0,05	2,4	< 0,1	0,6
0,058	-	-	NH4 ⁻ (mg/l)	0,065	-	-	< 0,01	-	-	-

Tableau 5b : Résultats des analyses physico-chimiques au cours des différentes campagnes

*Etude du colmatage et de sa cinétique de formation à l'interface
gravière/nappe - SRETIE*

Date d'analyse	Loire		Gravière		Piézo.1 (Sapin)	
Localisation	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
<u>Paramètres mesurés</u>						
pH	8,4	0,7	7,8	0,3	7,4	0,3
Conductivité (µS)	205	32	-	-	528	72
O2 dissous (mg/l)	-	-	5,5	4,9	-	-
Anions	-	-	2,15	0,35	4,7	1,96
Cations	-	-	2,09	0,33	4,65	1,90
SiO2 (mg/l)	-	-	1,3	0,72	17,8	5,94
Ca ⁺ (mg/l)	27,6	2,87	22,5	6,8	54,8	20,9
Mg ⁺ (mg/l)	4,82	1,13	6,15	1,3	13,4	4,52
Na ⁺ (mg/l)	15	2,6	7,39	1,64	11,5	5,03
K ⁺ (mg/l)	4	0,16	1,52	0,66	12,2	15,56
HCO3 ⁻ (mg/l)	85	12,2	89	25	211	79
Cl ⁻ (mg/l)	15,2	3	10,1	2,7	18,1	8,1
SO4 ²⁻ (mg/l)	20,7	2,1	13,6	2,5	33,2	22,8
Fe (ppb)	450	389	30,2	17,5	61	44,6
Mn (ppb)	63	17	< 5	-	218	284
NO3 ⁻ (mg/l)	7,4	5,4	< 0,1	-	2,6	1,5
NO2 ⁻ (mg/l)	0,06	0,01	< 0,01	-	0,95	1,23
PO4 (mg/l)	0,238	0,144	< 0,1	-	< 0,1	-
NH4 ⁻ (mg/l)	0,05	0,02	-	-	-	-

Tableau 5c : Moyenne de la période et écart type

5.3. Présentation des résultats

- Synthèse des résultats sur la Loire

Les deux tableaux 4 et 4 bis présentent les résultats des analyses physico-chimiques de la Loire à Orléans aux dates s'approchant le plus des dates de prises d'échantillon sur le site.

Le lieu de prélèvement sur la Loire se situe à 13 km en aval de Sandillon. Aucun rejet important ou phénomène hydrologique sur ce tronçon ne peut faire varier de façon significative la qualité de l'eau. On peut considérer les analyses sur Orléans représentatives de la qualité de la Loire au droit du site de la gravière.

- Synthèse des résultats sur le site

Le tableau 5 synthétise les résultats d'analyses lors des cinq campagnes de prélèvement et pour les différents paramètres mesurés. Le protocole initial prévoyait de suivre l'évolution de la qualité de l'eau sur les mêmes sites de prélèvement. Ceci n'a pas pu être respecté compte tenu de la sécheresse et de la nécessité d'installer de nouveaux dispositifs plus profonds. Un seul des piézomètres a été suivi à trois reprises.

La précision des mesures est de 5 % pour les éléments majeurs et de 10 % pour les éléments traces.

- Contexte général des analyses

Les cinq campagnes de mesures correspondent à des situations hydrologiques d'étiage, de basses eaux, de débit moyen et de crue, dont la fréquence de retour est voisine de 2 ans (voir tableau 6).

Date d'analyse	Saison	Débit de la Loire (m ³ /s)	Compar. au module inter-annuel	Compar. au débit d'étiage	Compar. au débit de crue de fréquence de retour 2 ans	Hauteur de la Loire (m) à Sandillon
Février 1988	HIVER	1710	350 (m ³ /s)	60 (m ³ /s)	1900	96,86
Août 1988	ETE	102	350	60	1900	94,42
Janvier 1989	HIVER	211	350	60	1900	95,25
Mars 1989 6/03/1989	PRINTEMPS	595	350	60	1900	96,03
Sept. 1989	AUTOMNE	53,5	350	60	1900	94,47

Tableau 6 : Situation hydrologique aux dates d'analyses physico-chimiques (m³/s et m)

5.4. Interprétation des résultats

5.4.1. Remarques

- A deux reprises, deux prélèvements en gravière conduisent à des résultats tout à fait comparables. Un seul échantillon en gravière semble donc représentatif de la qualité de l'eau.
- Certains éléments ont été recherchés mais n'ont pas ou rarement, dépassé les seuils détectables. Il s'agit notamment des éléments tels que CO₂, NO₃, NO₂, NH₄⁺, PO₄²⁻, Aluminium, Fluor.
- Certains paramètres présentent une très forte amplitude de variations : potassium, oxygène dissous, silicium. D'autres ont des variations plus modérées (HCO₃⁻, Ca⁺, Mg⁺, Na⁺, Conductivité) de l'ordre d'un facteur 5. Ces variations sont tantôt saisonnières (O₂), ou a priori aléatoires (Fer).
- Le calcul de la balance ionique montre qu'elle est équilibrée à 3,8 % en moyenne. Une légère sous-estimation des éléments cationiques constitue une règle générale pour 4 des 5 campagnes.
- Les blocs-diagrammes des figures suivantes permettent de comparer la composition chimique des systèmes Loire / nappe amont / gravière / nappe aval. Le chiffre porté sur le diagramme est celui de février 1988 ; la moyenne est calculée sur l'ensemble des 4 mesures et présente, pour certains paramètres, un écart type très important.

5.4.2. pH

Les eaux analysées sont neutres à basiques, le pH variant de 6,95 à plus de 9 (pour la Loire) (voir figure 12).

La Loire possède des pH basiques à très basiques.

La nappe amont ou aval est globalement neutre.

La gravière présente une variation saisonnière de pH, reflétant une plus forte alcalinité en hiver (pH = 8) et une neutralité en fin d'été (pH = 7). Cette acidification évaluée à une unité pH est liée à l'activité biologique de l'étang :

- forte production de CO₂ par la biomasse végétale en été et la nuit (respirations) ;
- consommation de CO₂ le jour par les organismes autotrophes pour le carbone.

En été, les alternances de ces phénomènes nocturnes et diurnes conduisent normalement à une augmentation de pH, mais les résultats montrent une acidification en période chaude, signe que l'activité prépondérante de la biomasse est l'activité respiratoire. Ceci se confirme par la présence massive en été de plantes aquatiques supérieures et par la quasi-absence de phytoplancton.

5.4.3. Oxygène dissous

Le paramètre oxygène dissous est très variable dans le temps et dans l'espace. Les valeurs enregistrées varient de 0,2 à 11,6 mg/l.

L'eau de la Loire est en moyenne plus oxygénée que celle de la gravière, elle-même plus oxygénée que celle de la nappe (voir figure 13). Ceci est surtout constaté en hiver. Les fortes diminutions d'oxygène en gravière ont lieu aux périodes chaudes et sont dues à de fortes consommations d'oxygène par la matière organique (oxydation, respiration, etc.) et par l'augmentation de température.

L'influence de la gravière sur la réoxygénation de l'eau souterraine semble rapidement atténuée dans le temps et dans l'espace. Ce phénomène serait dû au colmatage des berges par des particules réductrices, limitant ainsi le transfert de l'oxygène dissous d'un compartiment à l'autre.

5.4.4. Minéralisation des eaux

Certains paramètres globalisant permettent de définir le degré de minéralisation des eaux.

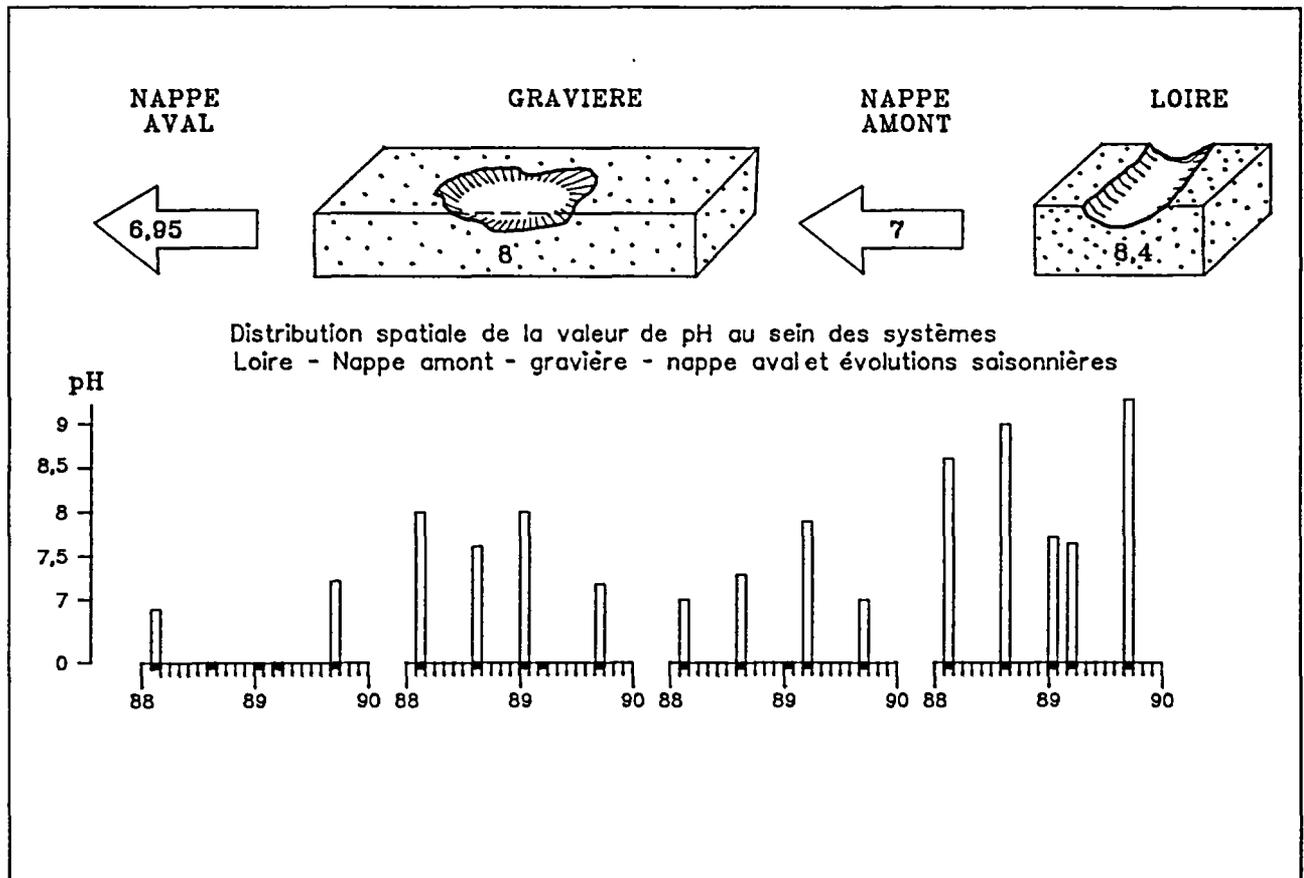


Figure 12 : Variations de pH

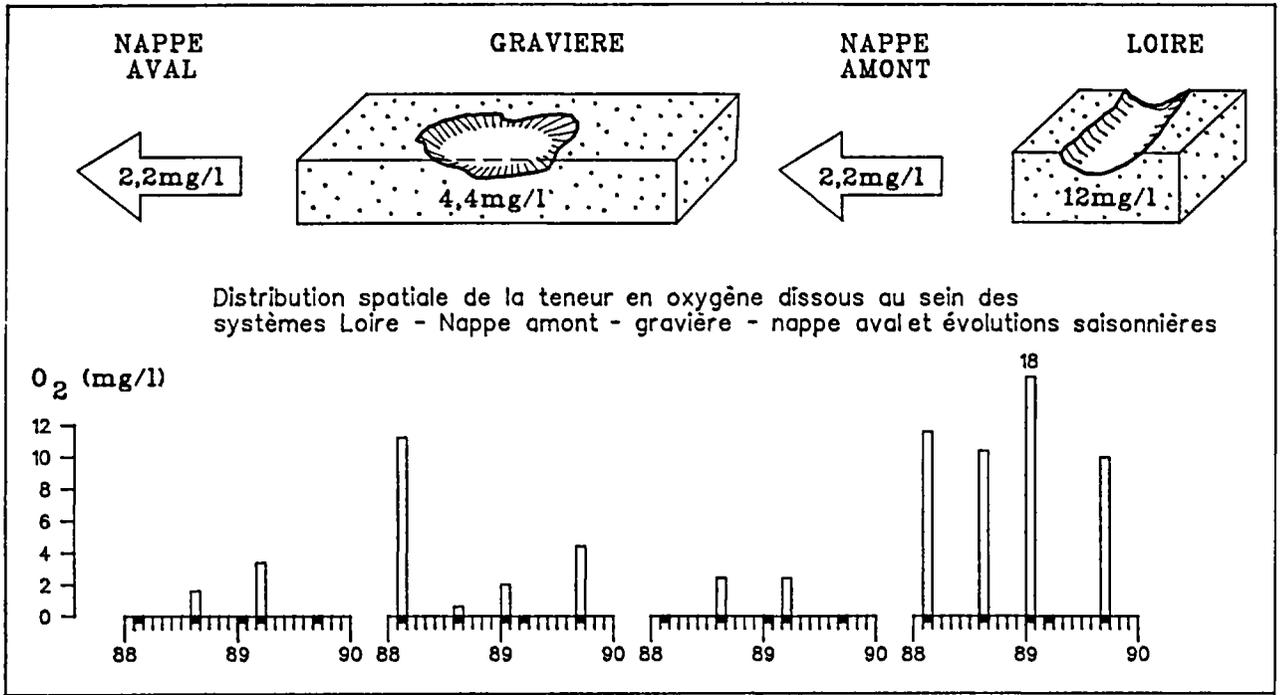


Figure 13 : Variations de l'oxygène dissous

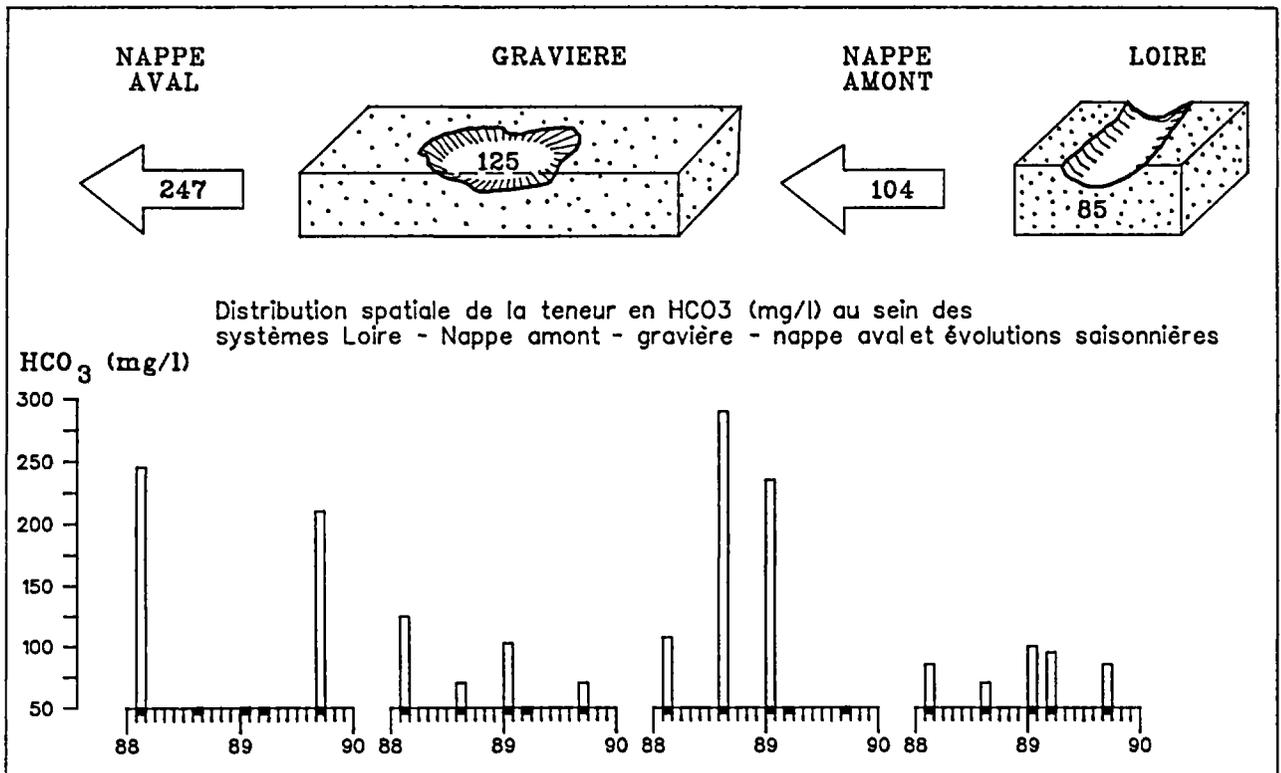


Figure 14 : Evolution des bicarbonates

La conductivité de la nappe (480 $\mu\text{S/s}$) est plus élevée que celle de la Loire (205 $\mu\text{S/s}$) et que celle de la gravière (160 $\mu\text{S/s}$).

De même, les valeurs absolues des anions et des cations sont plus élevées en nappe, signe d'une plus forte minéralisation.

Ce phénomène général s'explique par le comportement de certains éléments particuliers qui sont faiblement représentés en eaux superficielles et plus abondants en eaux souterraines :

- les bicarbonates (figure 14)
- les chlorures (figure 15)
- le calcium (figure 17)
- la silice (figure 19).

Les variations saisonnières de la minéralisation ne sont pas toujours nettes :

- les chlorures sont stables tout au long de l'année ;
- les sulfates, qui apparaissent stables au niveau de la gravière, peuvent être réduits et assimilés par des bactéries spécialisées et par la biomasse de la frange colmatée (figure 16) ;
- les ions bicarbonates diminuent nettement en période estivale dans la gravière ; cette évolution est liée à celle du pH, qui s'acidifie en période chaude. Au contraire, lorsque le milieu s'alcalinise en hiver, les ions CO_3^{2-} sont libérés (figure 14) ;
- les teneurs métalliques dissoutes comme le fer (figure 20) sont plus aléatoires et varient rapidement en fonction du contexte physico-chimique du site. On peut assister à des précipitations d'hydroxydes de fer, de manganèse ou d'aluminium au niveau de la frange colmatée.

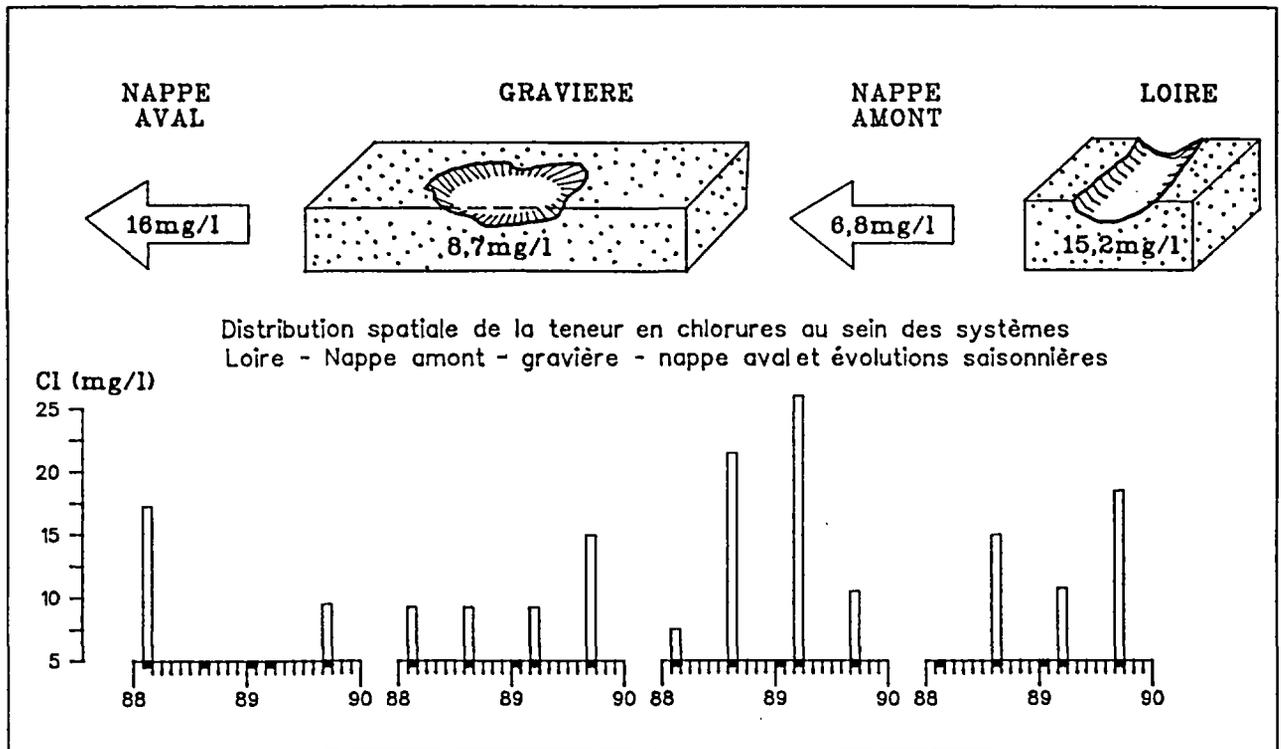


Figure 15 : Evolution des chlorures

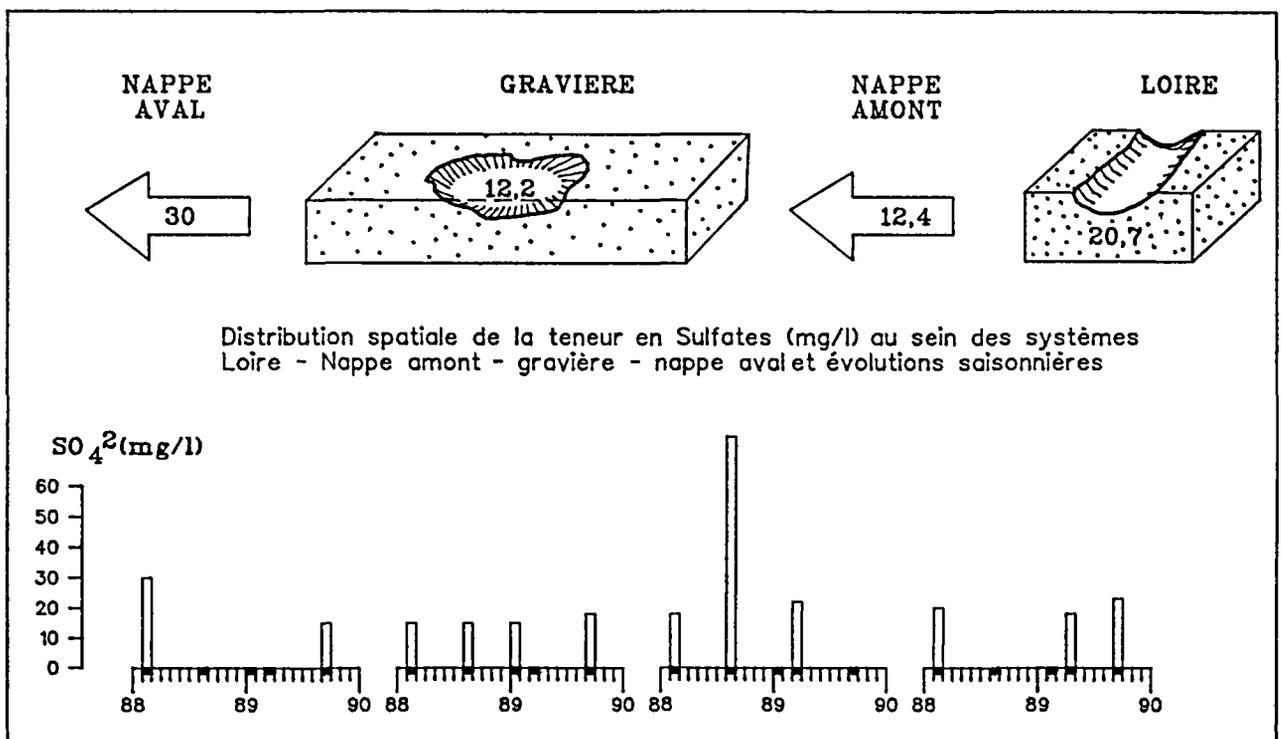


Figure 16 : Evolution des sulfates

*Etude du colmatage et de sa cinétique de formation à l'interface
gravière/nappe - SRETIE*

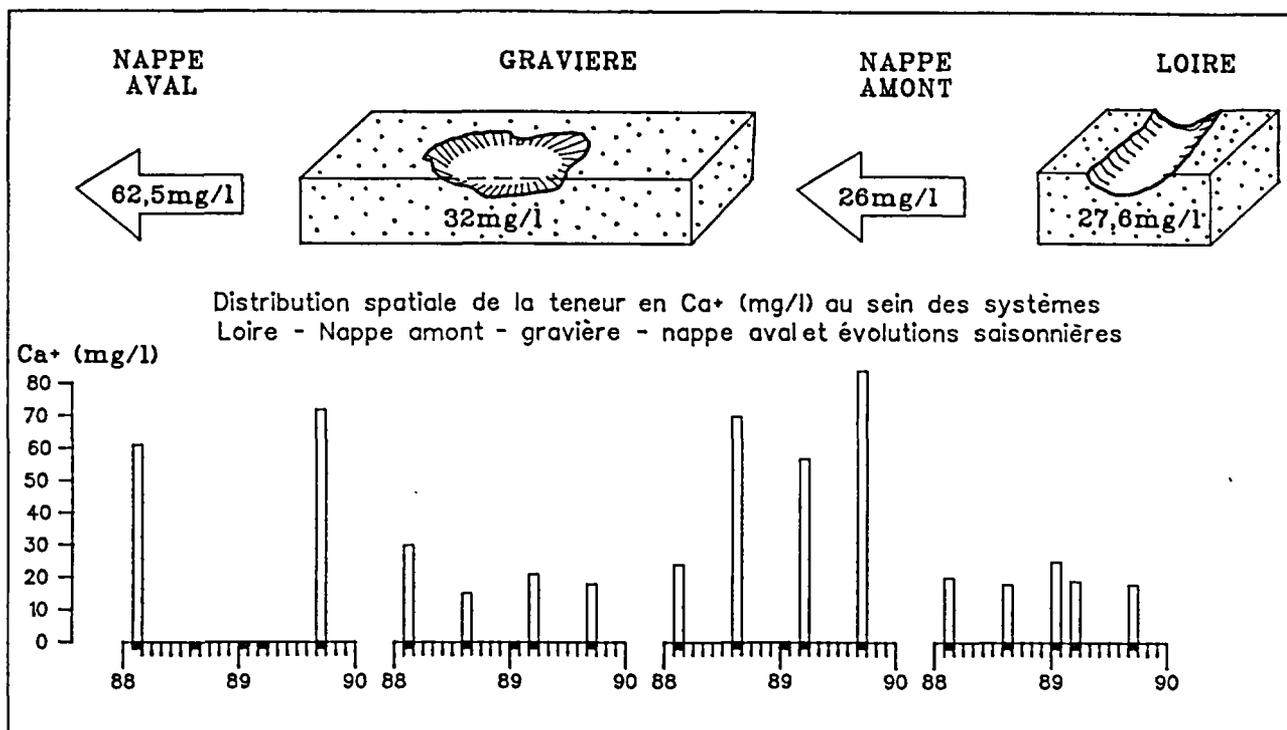


Figure 17 : Evolution du calcium

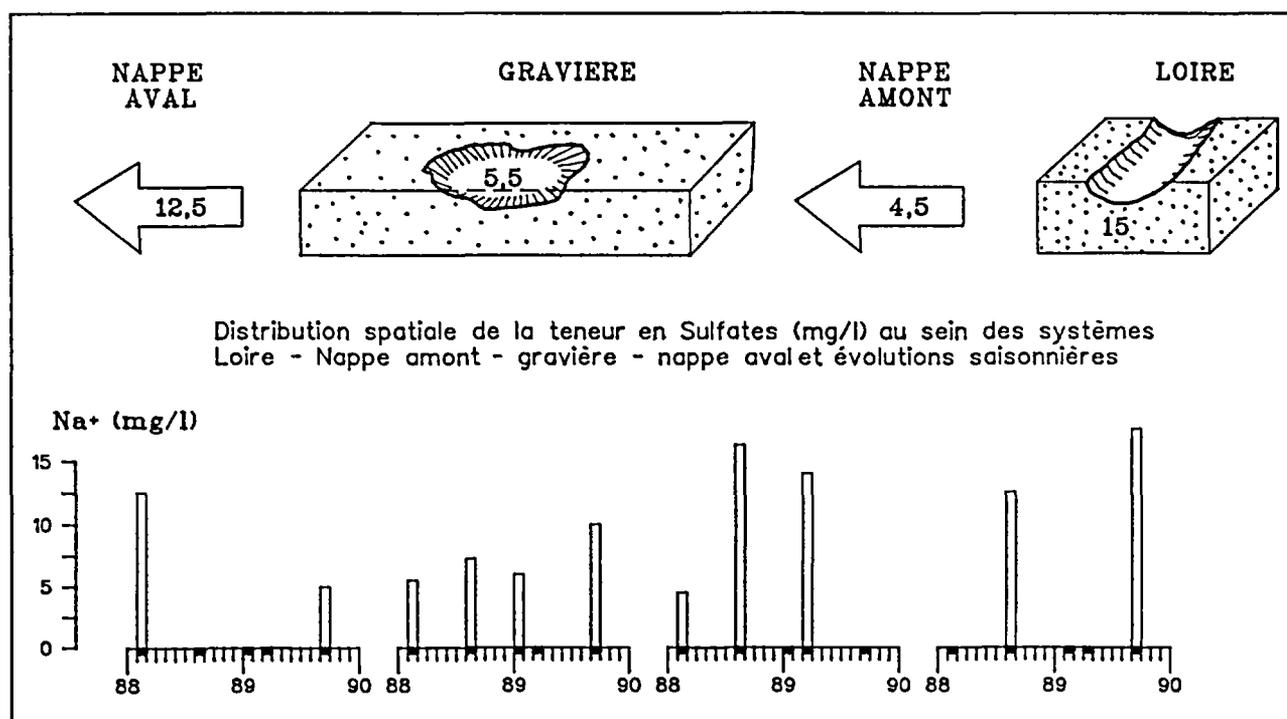


Figure 18 : Evolution du sodium

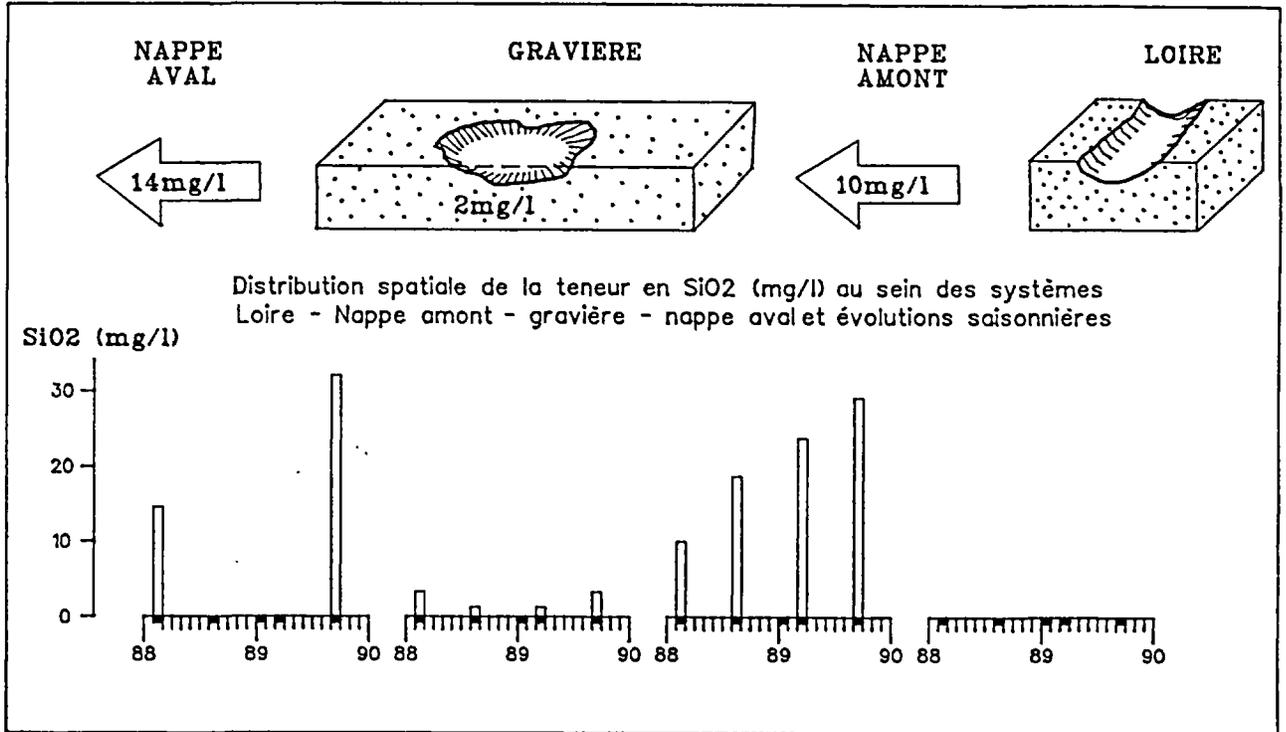


Figure 19 : Evolution des teneurs en silice

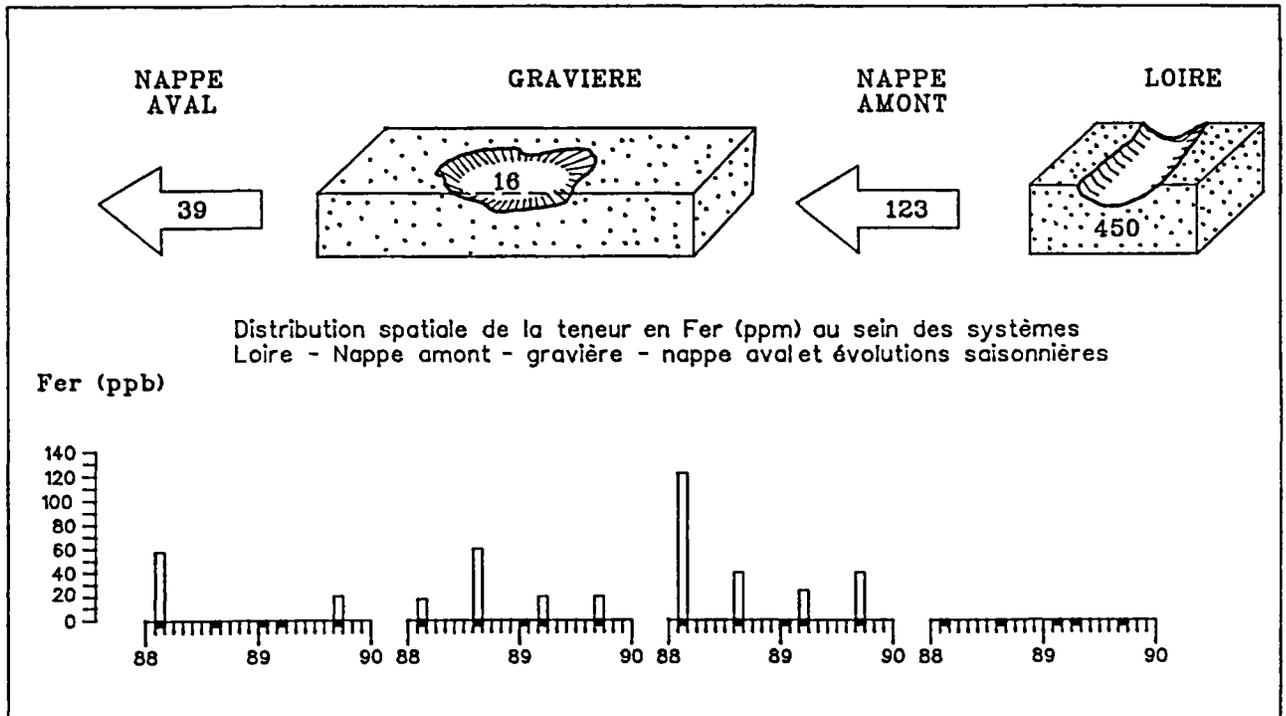


Figure 20 : Evolution des teneurs en fer

5.4.5. Substances azotées et phosphorées

Les analyses montrent globalement de faibles teneurs en éléments nutritifs, souvent même inférieures au seuil de détection.

La Loire contient en quantités variables :

- des nitrates (de < 0,5 mg/l à 13,2 mg/l en NO_3^-) ;
- des orthophosphates (de 0,02 à 0,13 mg/l en P) ;
- du phosphore total (de 0,20 à 0,35 mg/l en P).

La nappe amont présente quelques valeurs d'azote et de phosphore détectables mais inférieures à celles de la Loire.

La gravière et la nappe aval sont quasiment toujours au-dessous du seuil de détection de l'azote et du phosphore. Seul, le piézomètre "haie" montre un pic de nitrates (20 mg/l) en septembre 1990, ce pic traduisant un apport saisonnier massif dû à l'exploitation agricole (engrais, minéralisation des matières organiques du sol et des résidus de récolte).

Il apparaît donc que les nitrates et les phosphates ne migrent pas vers les compartiments nappe et gravière, ou tout au moins que leur migration n'est pas répercutée.

L'eau de la gravière est pauvre en azote et en phosphore, tout au long de l'année. Ces substances nutritives conditionnent la croissance du phytoplancton. Le rapport optimum N/P devrait être compris entre 7 et 15. Le fait que les concentrations en N et P soient dans l'ensemble très faibles ne permet pas de mettre en évidence la dénitrification et la consommation de ces éléments nutritifs par la biomasse.

5.5. Discussion

- Complexité des conditions d'analyses : l'interprétation des analyses physico-chimiques est rendue complexe par trois séries de phénomènes :
 - . les régimes hydrologiques du fleuve et de la nappe (type d'alimentation, dilution, etc.) ;
 - . la durée et le sens du transfert Loire/nappe/gravière, qui font qu'une variation chimique en Loire pourrait se retrouver 30 à 40 jours plus tard ;
 - . les conditions climatiques saisonnières qui déterminent l'activité biologique du milieu.
- Les principaux constats quant à la physico-chimie des eaux confirment les observations relatées dans la bibliographie. L'échange nappe/gravière s'accompagne de :

- . une plus faible minéralisation ;
 - . un pH plus alcalin en hiver et pH plus acide en été ;
 - . un enrichissement en oxygène dissous en hiver et non pas en été, du fait de la consommation par la biomasse ;
 - . une diminution des bicarbonates en période estivale ;
 - . une stabilité de la teneur en chlorures et en sulfates ;
 - . une diminution des teneurs en calcium et en silice ;
 - . de très faibles teneurs en nitrates et phosphates empêchant de déduire le rôle des gravières sur la dénitrification et sur la déphosphatation.
- L'influence de la gravière sur la qualité des eaux de la nappe semble faible à la vue des résultats d'analyses (exception faite des pollutions accidentelles non traitées ici). En fait, la gravière est en relation chimique continue avec la nappe et la nappe est ainsi soumise aux influences extérieures. Les variations des teneurs d'un compartiment à l'autre sont variables en fonction des conditions initiales, des ions, de la profondeur, de l'âge de la gravière. Le colmatage diminue les échanges nappe/gravière par différents processus :
- . mise en suspension et piégeage des matériaux par sédimentation ;
 - . absorption et relargage par des matières organiques (micro-organismes de la frange colmatée) ;
 - . précipitations et mise en solution de certains éléments par des phénomènes physiques ou biologiques.
- Il n'est pas impossible que les conditions climatiques exceptionnelles de sécheresse aient contribué à une forte activité biologique, très consommatrice d'éléments nutritifs (ce qui explique les faibles teneurs mêmes hivernales) et en oxygène (fortes respirations des végétaux supérieurs). Les berges de la Loire pouvant aussi contribuer au piégeage des éléments nutritifs avant même leur trajet vers la nappe.

6 - ANALYSES DES SEDIMENTS EN PLACE ET DEPOSES

6.1. Objet des mesures

Les analyses de sédiments ont deux objectifs :

- caractériser les composants sédimentés à des profondeurs et niveaux variables sur la berge et dans le fond ;
- suivre la nature et la quantité des éléments sédimentés sur une période donnée (pièges à sédiments).

6.2. Sédiments immergés au fond de la gravière

6.2.1. Conditions de prélèvements

Le prélèvements ont été effectués le 3 septembre 1987 en 4 sites répartis dans le fond de la gravière en eau (voir la figure 21 : Localisation des prélèvements de sédiments). La profondeur d'immersion variait de 40 cm (bordure d'étang) à 220 cm (milieu d'étang). Ces échantillons ainsi prélevés ont fait l'objet d'analyses granulométriques, et la perte au feu qui permet de déterminer la part de matière organique, a été mesurée

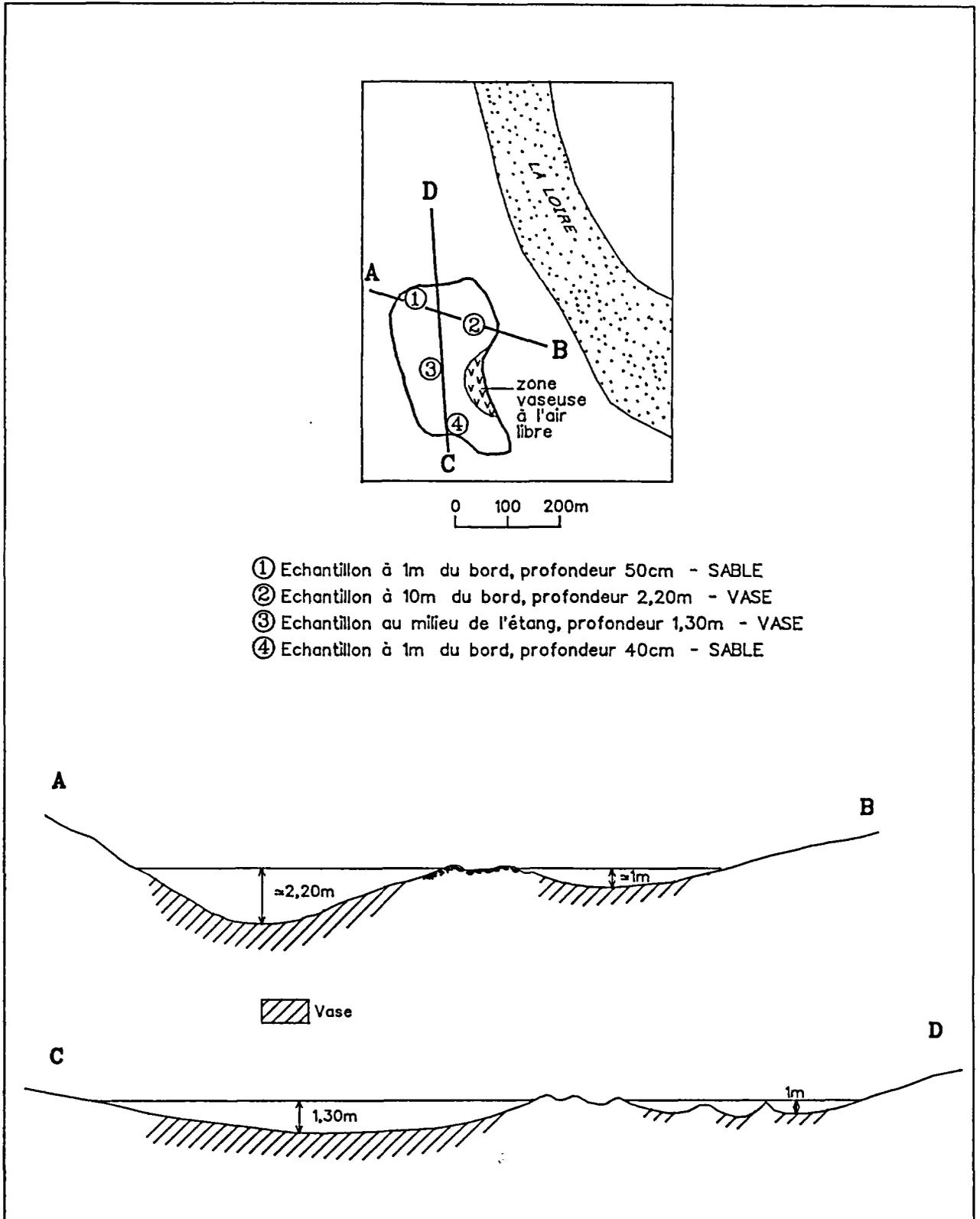


Figure 21 : Localisation des prélèvements de sédiments au fond de la gravière

6.2.2. Résultats et interprétation

Les deux prélèvements en bordure de l'étang appartiennent à un fond de sables grossiers avec des galets roulés et peu de matière organique et peu d'éléments fins.

Les deux prélèvements en milieu d'étang sont au contraire tirés de fonds vaseux noirs, très fins, riches en eau et en matière organique.

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

N° échantillon	1	2	3	4
Profondeur d'immersion	50 cm	220 cm	130 cm	40 cm
Nature du fond	sables graviers	vase noire	vase noire	sables graviers
% perte au feu	0,85 %	14,7 %	13,9 %	0,96 %
Teneur en eau	19 %	385 %	335 %	22 %
% graviers-cailloux	43 %	0 %	0 %	26 %
% gros sables	54 %	0 %	0 %	64 %
% sables fins, limons et argiles	3 %	100 %	100 %	10 %

Tableau 7 : Granulométrie et perte au feu des sédiments du fond
de la gravière

La nature et la composition des sédiments sont donc très variables selon la situation au fond de la gravière.

6.3. Sédiments sur berge

6.3.1. Conditions de prélèvements

Les prélèvements sur berges ont été effectués le 2 septembre 1988 selon deux profils ou transects sur berges (Nord et Ouest) à des distances variables de l'interface eau/berge (1 à 5 m) et à des profondeurs variables (tranche de 0 - 20 cm, 20 cm - 40 cm et 40 cm - 60 cm) (voir figure 22 : Localisation de prélèvements de sédiments sur berges).

Sur les échantillons ainsi prélevés, ont été réalisées :

- l'analyse granulométrique,
- l'analyse minéralogique aux rayons X,
- la perte au feu.

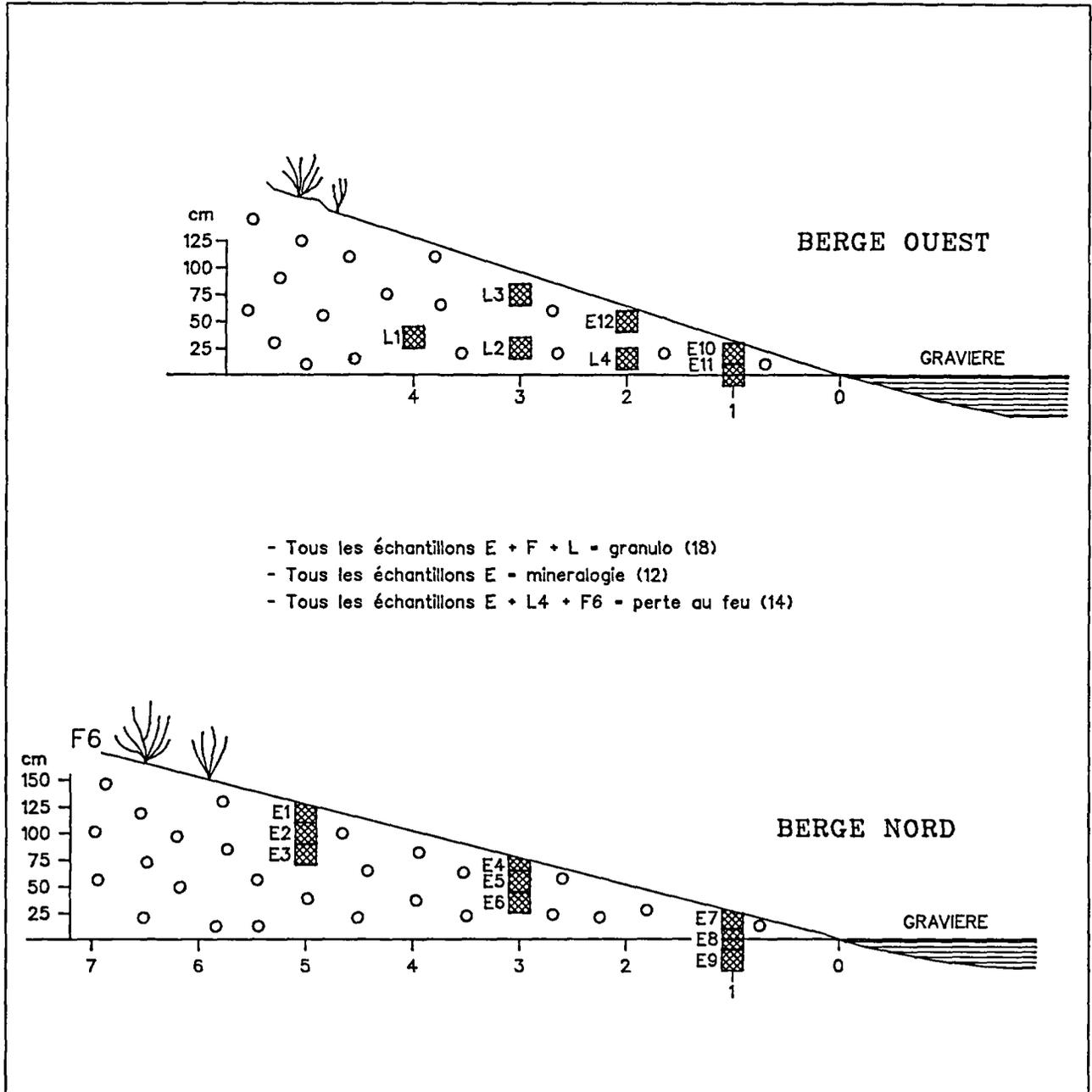


Figure 22 : Localisation des prélèvements sur berges

6.3.2. Résultats et commentaires

Les échantillons prélevés à différentes profondeurs et à différents niveaux de la berge ont des caractéristiques bien différentes comme le montrent les tableaux 6 (berge Nord) et 7 (berge Ouest).

Plusieurs phénomènes se dégagent :

- Le profil de bas de berge a un comportement différent de celui du haut ou milieu berge. Les 60 cm de ce profil sont relativement homogènes en nature et en composition minéralogique. La forte présence d'éléments fins et sables, l'absence d'éléments grossiers et une perte au feu élevée (présence de matières organiques) caractérisent ces bas de berges. Le profil de la berge Ouest est cependant un peu plus riche en éléments grossiers que le profil de la berge Nord.
- Sur les hauts et milieux de berges, les éléments deviennent plus grossiers en profondeur. Les sables grossiers sont dominants. Les éléments fins diminuent avec la profondeur, mais augmentent au fur et à mesure que l'on s'approche de la berge. La teneur en quartz est toujours abondante et devient même très abondante à partir de 40 cm, contrairement aux argiles qui, en faible proportion de 0 à 40 cm deviennent des éléments traces à partir de 40 cm.

La perte au feu diminue nettement à partir de 40 cm et montre ainsi que la teneur en éléments organiques y devient plus faible.

NUMERO DE L'ECHANT.	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	F5	F6
PROF. PRELEVEMENT (cm)	0-20	20-40	40-60	0-20	20-40	40-60	0-20	20-40	40-60	1 m	1,30 m
DISTANCE A LA BERGE(m)	5 m	5 m	3 m	3 m	3 m	1 m	1 m	1 m	5 m	7 m	
PERTE AU FEU (%)	2.10	2.75	1.24	2.54	2.40	1.70	2.42	2.88	2.55	0.68	-
G R A N U L O M E T R I E											
% ARGILES, LIMONS, SABLES FINS	30 %	25 %	13 %	37 %	46 %	30 %	48 %	45 %	42 %	7 %	50 %
% GROS SABLES	48 %	47 %	41 %	53 %	44 %	43 %	46 %	52 %	48 %	76 %	43 %
% GRAVIERS	14 %	19 %	38 %	6 %	9 %	25 %	15 %	3 %	9 %	17 %	7 %
% CAILLOUX	8 %	9 %	8 %	4 %	1 %	2 %	1 %	-	1 %	-	-
M I N E R A L O G I E											
QUARTZ	abondant présent	abondant présent	abondant très abond.	abondant	abondant présent	abondant à très abondant	abondant à très abondant	présent	présent		
ORTHOSE	faible	faible	traces/ faibles		faible	faible		trace faible	faible		
PLAGIOCLASES	faible	faible	traces/ faibles	faible	faible	traces	faible	trace faible	faible		
FELDSPATH				faible			faible				
MICAS	traces			traces	traces			traces			
ARGILES	faible	faible	traces	faible	faible	trace	trace	faible présent	faible présent		

Tableau 8 : Analyse de sédiments sur des profils de la berge Nord

*Etude du colmatage et de sa cinétique de formation à l'interface
gravière/nappe - SRETIE*

NUNERO DE L'ECHANT.	E10	E11	E12	L3	L4	L2	L1
PROF. PRELEVEMENT (cm)	0-20	20-40	10-20	20-40	40-60	60-80	80-100
DISTANCE A LA BERGE (m)	1 m	1 m	2 m	3 m	2 m	3 m	4 m
PERTE AU FER (%)	2.30	2.16	3.30	-	1.34	-	-
G R A N U L O M E T R I E							
% ARGILES, LIMONS, SABLES FINS	28 %	18 %	40 %	40 %	9 %	39 %	56 %
% GROS SABLES	40 %	40 %	42 %	42 %	37 %	52 %	37 %
% GRAVIERS	16 %	30 %	10 %	15 %	32 %	5 %	7 %
% CAILLOUX	16 %	12 %	8 %	3 %	22 %	4 %	-
M I N E R A L O G I E							
QUARTZ	présent	abondant très abond.	présent				
ORTHOSE	faible	trace/ faible	faible/ présent				
PLAGIOCLASES	faible	trace/ faible	faible/ présent				
FELDSPATH	-	-	-				
MICAS	-	-	-				
ARGILES	faible/ présent	traces	faible				

Tableau 9 : Analyse de sédiments sur des profils de la berge ouest

6.4. Pièges à sédiments

6.4.1. Principe

Les pièges à sédiments sont destinés à recueillir les éléments sédimentés, in situ, au fond de l'étang, après une durée assez longue pour obtenir une quantité appréciable de matières en suspension (quinze jours à deux mois). Un réceptacle est posé au fond et vient affleurer avec les sédiments en place. Il est fixé par des systèmes de bouées et est pourvu d'un couvercle que l'on met en place juste avant la remontée. Les pièges permettent, par comparaison aux analyses de sédiments en place, de suivre les variations saisonnières du dépôt sédimentaire, et d'évaluer la dynamique sédimentaire. Les pièges doivent être conçus, placés de façon à éviter les remous, les déplacements et manoeuvrés délicatement

6.4.2. Conditions d'analyses

Les pièges à sédiments ont été déposés à 3 endroits et pour trois périodes différentes (automne, hiver, fin de printemps, été) (voir figure 23 : Localisation des pièges à sédiments et durée de mise en place).

*Etude du colmatage et de sa cinétique de formation à l'interface
gravière/nappe - SRETIE*

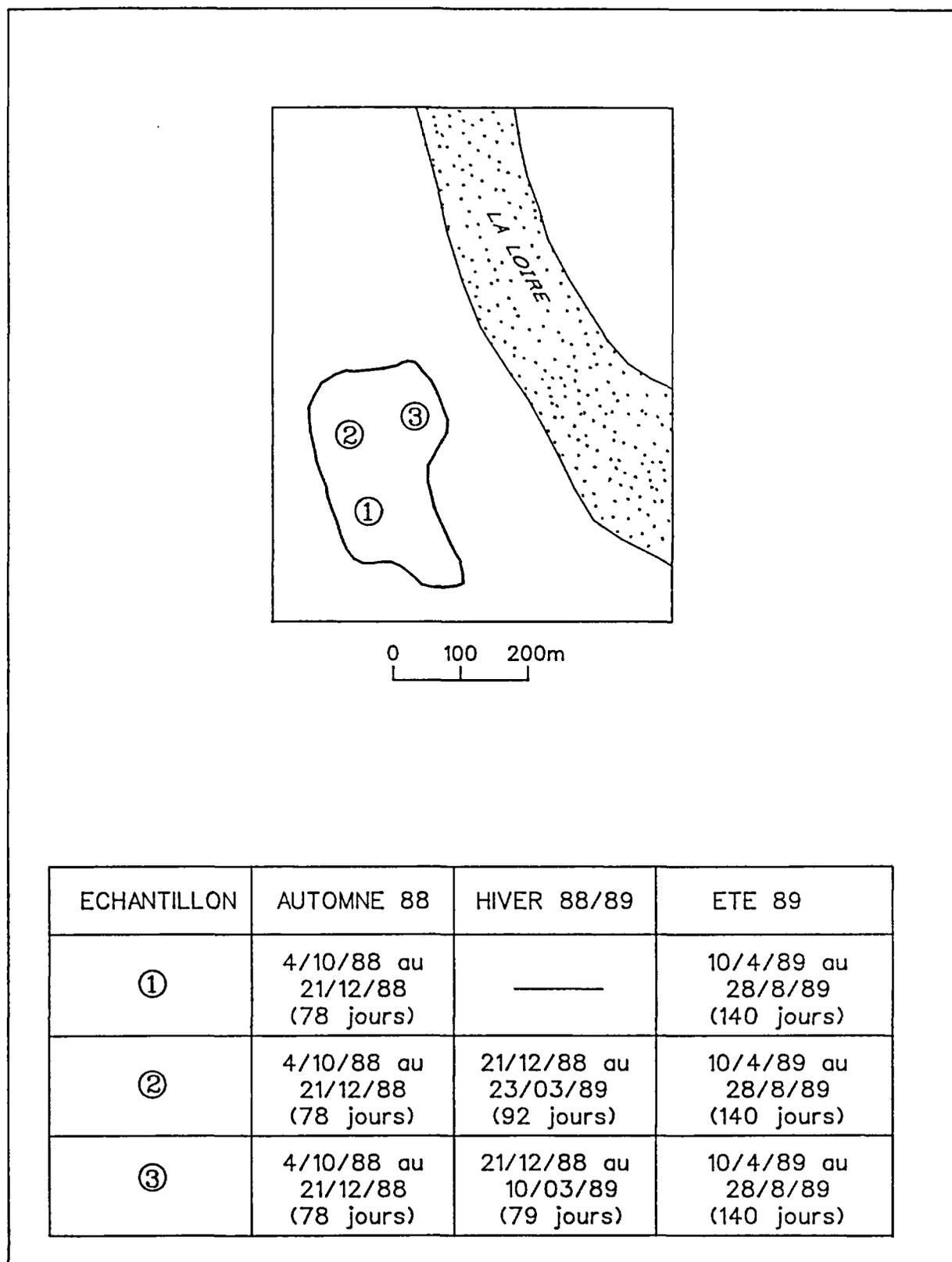


Figure 23 : Localisation des pièges à sédiments et durée de mise en place

6.4.3. Résultats et commentaires

Les échantillons des sédiments recueillis dans les pièges ont fait l'objet d'une mesure de perte de feu, pour trois sites et à trois périodes de l'année.

N° échantillon	Automne 1988	Hiver 1988/1989	Eté 1989
1	8,65	-	1,95
2	9,95	14,07	3,60
3	11,55	14,95	4,40

Valeurs exprimées en % de perte au feu

Tableau 10 : Analyse de la perte au feu sur les sédiments des pièges

Les valeurs de perte au feu constatées sont en moyenne supérieures aux valeurs des sédiments en place, notamment pour les deux campagnes d'automne et d'hiver. Les teneurs en matière organique des sédiments sont donc supérieures en période de faible activité biologique.

Le site n° 3 présente la plus forte teneur en matière organique, quelle que soit la saison.

6.5. Conclusion

- **Hétérogénéité des matériaux déposés** : sur le fond, la frange colmatée est riche en éléments fins et en matières organiques. L'épaisseur du colmatage varie avec le relief du fond et a tendance à diminuer lorsque l'on s'approche des bords. Sur les berges, les sédiments sont nettement moins riches en matières organiques et en éléments fins. On observe cependant une diminution progressive d'éléments fins et de matières organiques en profondeur et vers l'extérieur des berges. La berge Ouest a globalement une composition minéralogique plus grossière que sur la berge Nord, signe d'un transfert d'eau plus actif.

Ces constats s'expliquent par le processus même du colmatage qui se caractérise par une sédimentation de particules fines oblitérant le milieu poreux initial. Le support capture des particules diverses telles que argiles, colloïdes, bactéries, bulles de gaz, etc. L'épaisseur de la frange colmatée dépend du rapport entre la dimension des pores, la taille des particules qui se déposent et l'état d'encombrement des pores. Le colmatage peut apparaître plus profond et plus poreux dans la zone de battage que dans le fond. Cependant, dans la zone de battage, l'amont (ici Ouest) peut subir l'effet de drain par la nappe et avoir une très faible couche colmatante.

Au contraire, la berge aval peut présenter une plus grande proportion d'éléments fins et jouer pleinement un rôle colmatant.

- **Conséquences du colmatage sur la relation nappe/gravière :** l'hétérogénéité du colmatage du fond et des berges montre que toute élévation du niveau de la nappe ou de la gravière peut augmenter les échanges car l'eau atteint les franges non ou peu colmatées des berges, contrairement au fond qui constitue de façon permanente un filtre important. Ceci tendrait à montrer que la gravière pourrait réagir rapidement à une crue de la nappe, sans restituer aussi rapidement cette élévation de niveau à l'aval immédiat de la gravière, du fait de son colmatage.

Les photos 4 et 5 permettent d'apprécier visuellement les différentes formes de sédimentation en fond de gravière et en bordure de berges.



photo -4-

Détails des dépôts sédimentaires en fond de gravière



photo -5-

Détails des dépôts sédimentaires en bordure de berges

7 - ACTIVITES BIOLOGIQUES DE LA GRAVIERE

7.1. Objet des recherches "biologiques"

La détermination de l'activité biologique de la gravière a pour but d'évaluer la phase organique participant au colmatage.

7.2. Dispositifs mis en oeuvre

La mesure des paramètres biologiques a été approchée de deux façons :

- mesure de la chlorophylle "a" dans les eaux de la gravière,
- installation de pièges à périphton.

7.3. Résultats

- Teneur en chlorophylle "a" et en phéopigments

Les échantillons du 5 août 1988 ont tous des niveaux de chlorophylle "a" et phéopigments inférieurs aux seuils de détection mesurables (respectivement de 10 µg/l et 5 µg/l).

- Pièges à périphton

Ces pièges se sont révélés inexploitable du fait de leur mise hors d'eau lors de la période 1988 et 1989 caractérisée par une forte sécheresse.

7.4. Commentaires

L'absence de phytoplancton dans les eaux de la gravière pourrait traduire une faible activité biologique. Les très faibles teneurs azotées et surtout phosphorées pourraient d'ailleurs expliquer les faibles teneurs en chlorophylle "a", telles que le montrent les modèles du type :

$$\log [\text{chloro. "a"}] = \alpha + \beta \log [\text{phosphore total}]$$

avec chloro "a" = concentration en mg/m³
phosphore = concentration en mg/m³
 α et β = constantes du modèle

Les faibles teneurs en N et P n'ont pas permis de calculer le rapport N/P qui, pour favoriser la croissance du phytoplancton, doit être compris entre 7 et 15.

En fait, en période estivale, les éléments nutritifs, si peu abondants soient-ils, sont consommés par les végétaux supérieurs, en l'occurrence les cératophylles, qui envahissent le plan d'eau (voir photos).

Les végétaux supérieurs piègent ainsi les éléments nutritifs et les restituent sous forme organique lors de leurs morts et de leurs sédimentations au fond de la gravière.

Ce peuplement épais de cératophylles recouvre totalement la surface de l'étang, limitant les échanges avec l'atmosphère (faible oxygénation en été), empêchant le développement du phytoplancton (absence de lumière et d'éléments nutritifs), responsable par son activité respiratoire intense de la baisse de pH et de la teneur en oxygène dissous. La faible profondeur de l'étang favorise d'ailleurs la prolifération des végétaux supérieurs.



photo -6-
Prolifération de cératophylles
sur le plan d'eau



photo -7-
Détail des cératophylles

8 - MISE EN EVIDENCE DU COLMATAGE

Les différents domaines abordés précédemment ont permis de décrire et d'analyser les situations hydrologiques, physico-chimiques et biologiques du site, pendant toute la période d'étude.

Les conclusions ne sont pas toujours évidentes du fait des conditions mêmes du site (système alluvial fortement influencé par le système karstique profond), et des conditions climatologiques "exceptionnelles" de sécheresse.

Il est néanmoins possible de synthétiser les principaux résultats afin de déterminer les processus de colmatage. L'aspect quantitatif et la cinétique propre au colmatage n'ont pas pu être mis clairement en évidence, du fait d'expérimentations qui n'ont pas abouti en raison de la sécheresse.

8.1. Liaison hydrologique entre nappe/gravière/Loire

Les figures 24, 25 et 26 illustrent le colmatage de la gravière. En effet, lors d'une crue, la nappe, en amont comme en aval, réagit par une élévation de niveau modérée et retardée de 30 à 40 jours, tandis que la gravière conserve un niveau assez stable et semble assez indifférente à la crue.

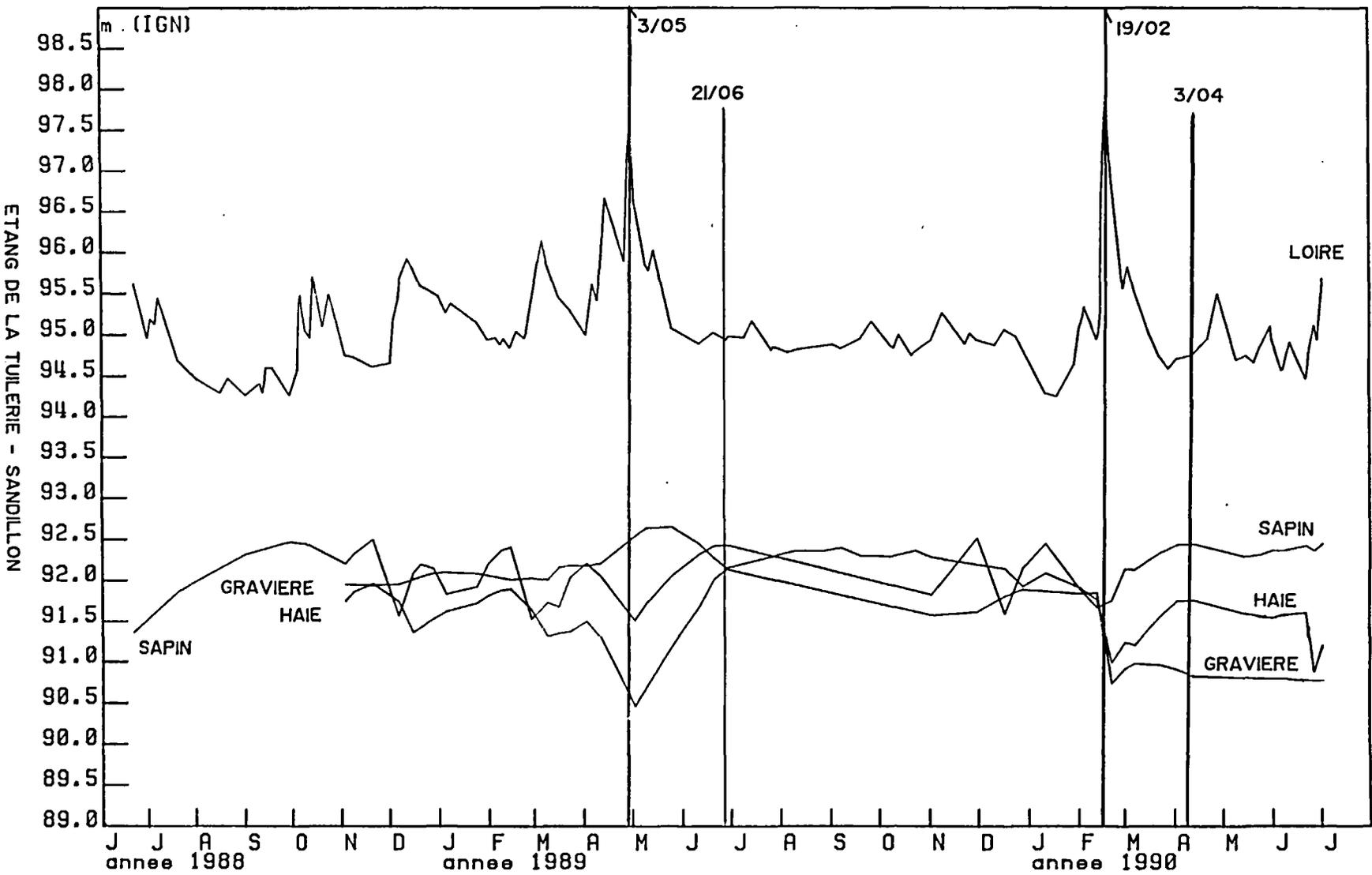


Figure 24 : Mise en évidence des deux périodes de crue

*Etude du colmatage et de sa cinétique de formation à l'interface
gravière/nappe - SRETIE*

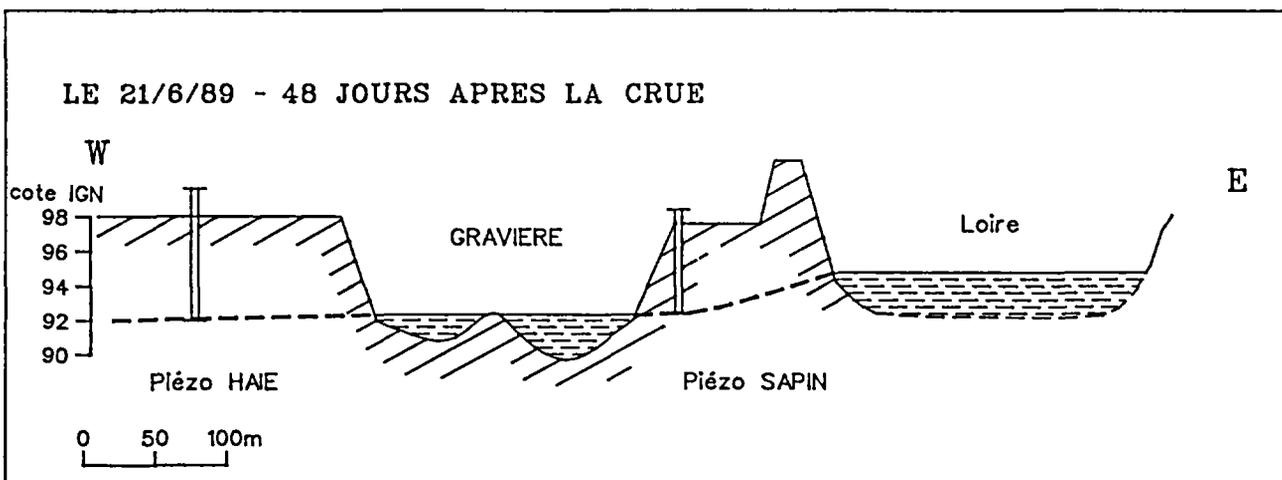
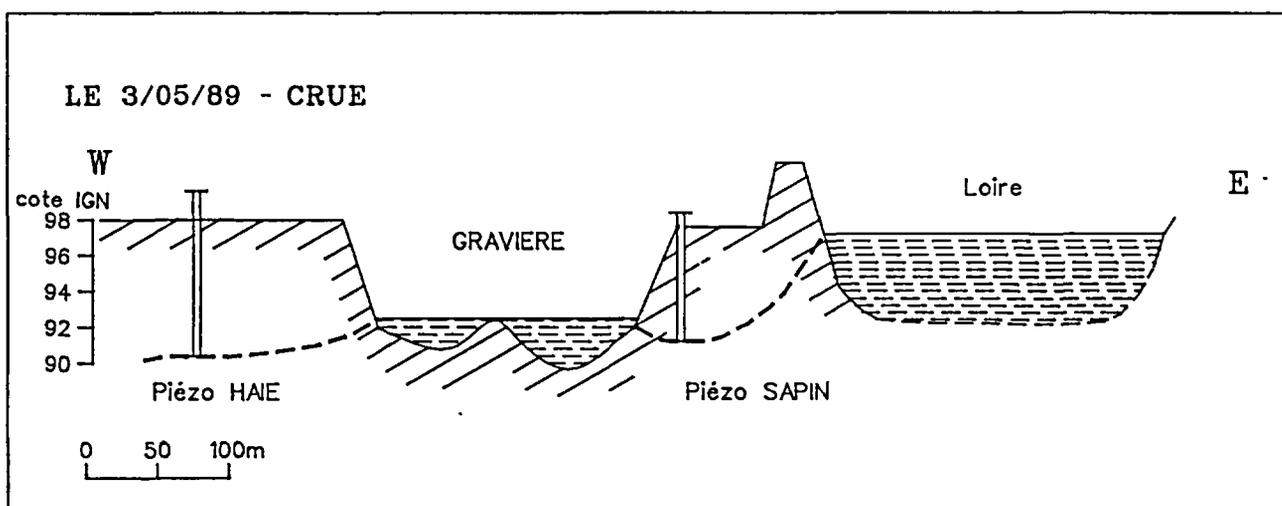
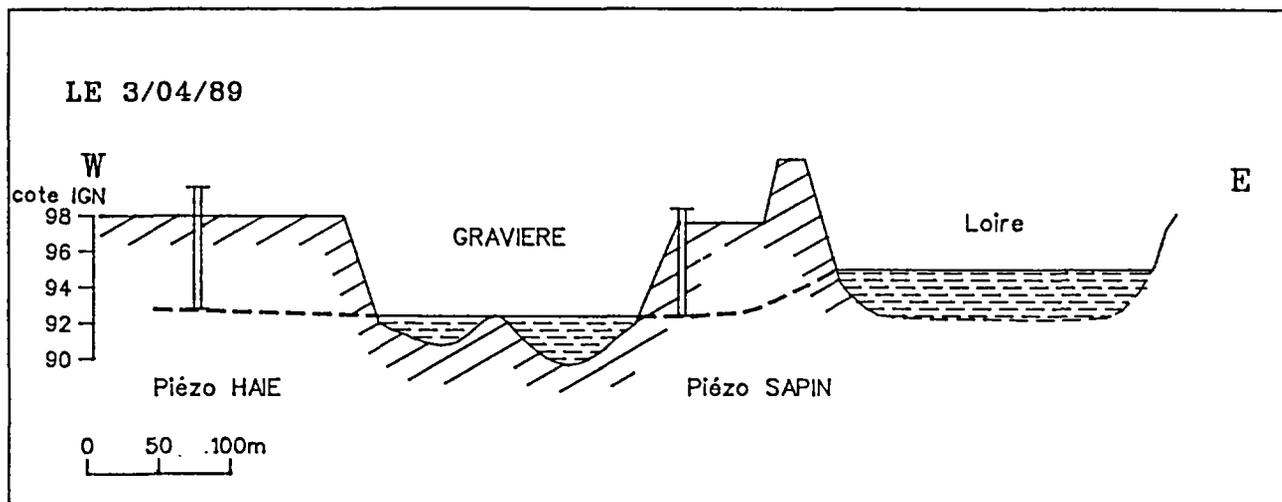
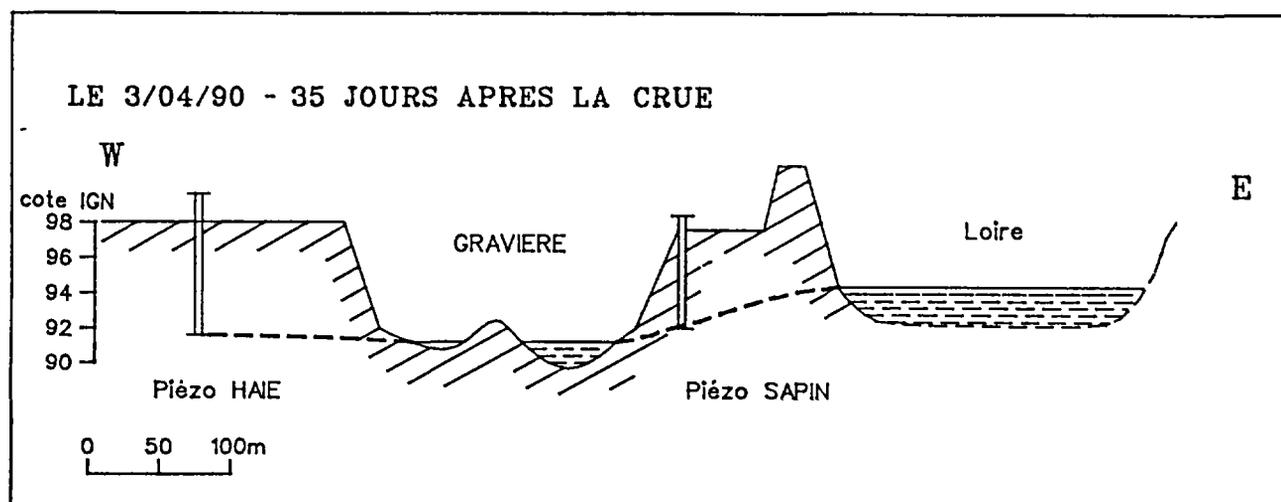
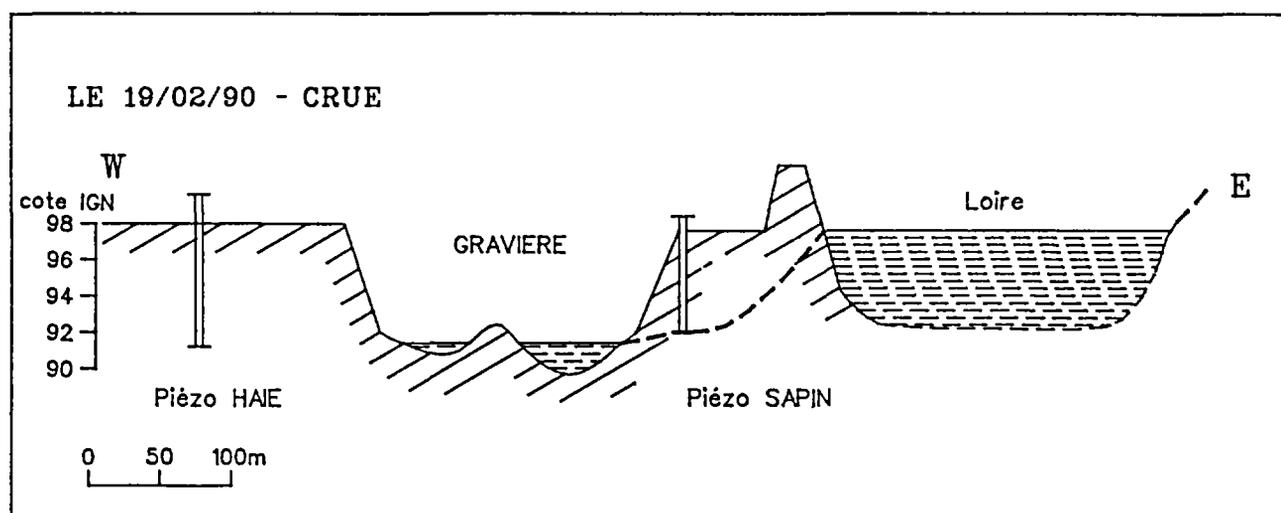
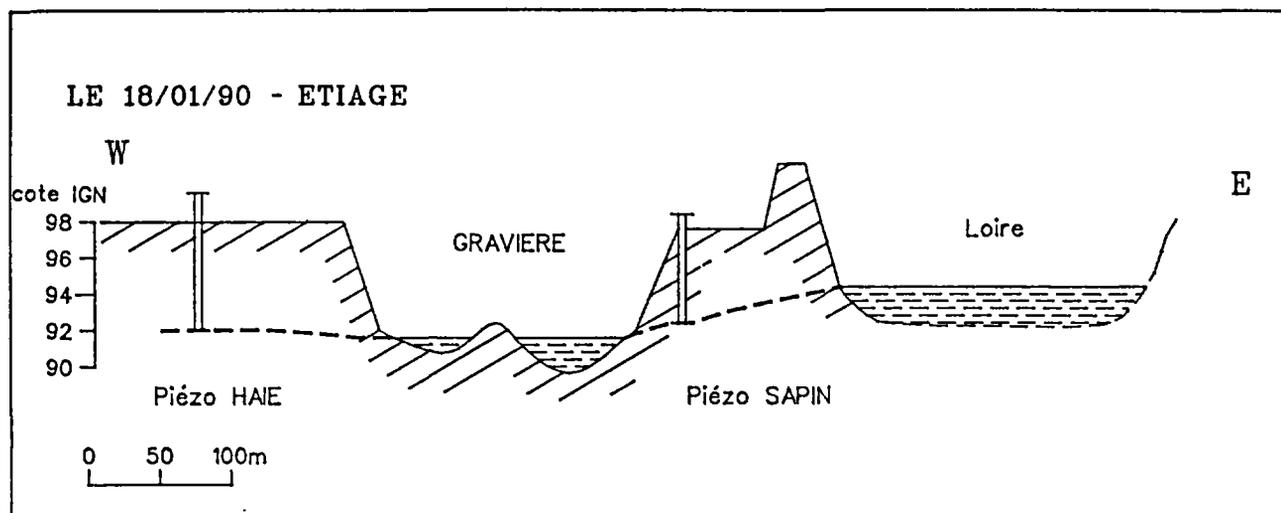


Figure 25 : Chroniques hydrologiques de la Loire, de la nappe et de la gravière à trois dates différentes lors de la crue de printemps 1989

**Etude du colmatage et de sa cinétique de formation à l'interface
gravière/nappe - SRETIE**



**Figure 26 : Chroniques hydrologiques de la Loire, de la nappe et de la
gravière à trois dates différentes lors de la crue de printemps 1990**

Toute se passe comme si la gravière était colmatée au point de limiter considérablement les échanges d'eau avec la nappe. En effet, le colmatage est un phénomène inéluctable s'inscrivant dans un processus naturel d'évolution morphodynamique ; le vieillissement de la gravière se traduit par un profil d'équilibre des berges, un comblement partiel des fonds et un ralentissement progressif des échanges avec la nappe associée.

Une étude menée en Garonne montre que le colmatage ne se modifie plus à partir de 1,5 à 7 ans. En Alsace, on a observé que 2/3 du colmatage peut avoir lieu pendant la phase d'exploitation et que 1/3 seulement est du à l'activité biologique postérieure.

Les résultats de cette étude montrent bien que les échanges nappe/gravière sont modérés dans le temps et dans l'espace. Par contre, l'étude montre qu'en période d'étiage de la Loire, la nappe de calcaires de Beauce peut venir alimenter les alluvions superficielles. Au contraire, en période de crue, la Loire vient alimenter les alluvions et les calcaires de Beauce, expliquant ainsi la réponse modérée et retardée de la nappe aux crues de la Loire.

8.2. Caractéristiques physico-chimiques

L'ensemble des analyses ne montre pas particulièrement de gradient chimique, mais au contraire, une relative indépendance des milieux, confirmant les observations hydrologiques :

- la Loire est assez constante en qualité, excepté pour des paramètres saisonniers ou aléatoires ;
- la qualité de la nappe, en amont ou en aval de la gravière semble se rapprocher de celle de l'eau des forages profonds en calcaire de Beauce (voir tableau 11). Ceci est surtout net pour le pH et les nitrates (valeurs sub-nulles). Ceci conforte le fait d'une alimentation des alluvions par la nappe des calcaires de Beauce. La qualité de l'eau entre la Loire et la gravière semble correspondre à un mélange des deux qualités, montrant ainsi l'influence des eaux de la Loire sur la nappe à certaines périodes de crue ;
- la gravière présente une évolution chimique saisonnière, typique d'un étang. L'activité biologique influe sur les paramètres comme l'oxygène, le pH, et certains ions. Quelle que soit la saison, les substances azotées et phosphorées sont toujours très faiblement représentées et sont confirmées par l'absence de chlorophylle "a" (inférieur au seuil de détection).

NOM DES COMMUNES	LIEU-DIT	PROFONDEUR OUVRAGE	NAPPE EXPLOITEE				
DARVOY	CLOS DE L ARCHEVEQUE	078.20)	CALCAIRES DE BEAUCE				
FEROLLES	CLOS DES GRASSINS	059.00)					
JARGEAU	LE CLOS-MEIN	069.50)					
SANDILLON	LES CAILLOUX	083.00)					

CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES : (ORDRE DE GRANDEUR)							
	COND	PH	TH	M.O.	CL	NO3	SO4
	μS/CM		°F	(1)	MG/L	MG/L	MG/L

DARVOY	475	7.3	27	0.3	15	0	18
FEROLLES	250	7.8	12	0.7	10	10	15
JARGEAU	350	7.5	19	0.5	14	0	8
SANDILLON	300	7.7	15	0.3	25	0	7

(1) MATIERES ORGANIQUES EN MG/L O2

Tableau 11 : Qualité des eaux souterraines des forages profonds
en calcaire de Beauce

8.3. Caractéristiques biologiques

L'absence de chlorophylle "a" (donc l'absence de phytoplancton), les faibles teneurs azotées ou phosphorées masquent la très importante prolifération de végétaux aquatiques type cératophylles, qui a été observée en périodes estivales. Ces plantes occupent la surface de l'eau, forment un écran à la lumière, consomment et restituent l'oxygène lors de leurs activités respiratoires et photosynthétiques, consomment les substances nutritives, fournissent une matière organique importante et massive qui en hiver meurt et sédimente au fond de la gravière, se dégradant lentement compte tenu du froid et ne pouvant être réutilisée qu'au printemps ou à l'été prochain, contribuant ainsi au renouvellement du peuplement végétal.

8.4. Caractéristiques de la sédimentation

L'analyse des sédiments en place montre un fort dépôt d'éléments fins, organiques, au fond de l'étang. L'intensité des dépôts fins et organiques diminue selon un gradient latéral du fond à l'extérieur des berges, et selon un gradient de profondeur. Les parties hautes des berges sont peu colmatées et le matériel est grossier. Sur berges les tranches de sol comprises entre 40 et 60 cm montrent encore de la matière organique, mais en plus faible proportion par rapport à la surface.

Le colmatage semble plus prononcé sur la berge Nord, indiquant que les échanges gravière/nappe se font préférentiellement au niveau de la berge Ouest, qui correspond au sens général d'écoulement de la nappe.

La cinétique du colmatage, telle qu'elle a pu être observée au stade de vieillissement de la gravière, correspond à un colmatage par de la matière organique qui sédimente en hiver, après la mort des végétaux. La matière organique s'accumule, sans se minéraliser jusqu'au printemps. La reprise des activités biologiques permet la transformation partielle de la matière organique et la reconstitution du peuplement.

La frange colmatée du fond et des berges individualise ainsi les eaux de la gravière. Ceci est d'autant plus vrai pendant la période d'étude car la faible hauteur d'eau due à la sécheresse, n'a pas permis de favoriser les échanges avec la nappe sur les hauts de berges qui sont beaucoup plus perméables et poreux (zone active du transfert) que le fond ou les bas des berges. En effet, il a été montré que, lors des crues du Var, les échanges avec les nappes sont proportionnellement plus importants du fait même du faible colmatage des hauts de berges.

CONCLUSION

La description et l'interprétation des mesures et phénomènes observés sur la gravière de Sandillon permettent de mettre en évidence le colmatage des berges et du fond à l'interface gravière/nappe.

L'étude montre que la gravière de Sandillon est individualisée du système- eau souterraine - par un colmatage important du fond et des bas de berges. La frange colmatée réduit considérablement les échanges gravière/nappe et rend le niveau de la gravière indépendant des fluctuations de niveau de la Loire et de la nappe. Cette individualisation s'observe également pour les paramètres physico-chimiques de la qualité de l'eau. Le développement important de cératophylles conduit à fournir en période hivernale un matériel sédimentaire organique qui assure un apport annuel à la frange colmatante du fond (très forte teneur en matière organique et en éléments fins).

Cependant, les conditions hydrogéologiques du site d'étude (relation avec la nappe des calcaires de Beauce) et les conditions climatiques générales (sécheresse en 1988-1989 et 1990) n'ont pas permis de développer l'aspect quantitatif et la cinétique propre au colmatage.

Dans le cadre d'une prochaine contribution à la connaissance du processus d'échanges gravière/nappe, un des points importants réside dans le choix d'un site d'étude qui d'un point de vue hydrogéologique soit plus simple et donc mieux connu dans son fonctionnement.

Plusieurs thèmes, qui n'ont pas été étudiés ou qui n'ont pas pu l'être en raison de la sécheresse, gagneraient à être développés :

- l'analyse des paramètres bactériologiques visant à estimer les risques sanitaires, d'une gravière vis-à-vis de la qualité de la nappe ;
- le suivi du cycle biologique par le phytoplancton (chlorophylle "a") et une estimation de la production primaire du plan d'eau ;
- la mise en évidence du processus de dénitrification au niveau de la frange colmatée. Cet aspect n'a pas été développé dans l'étude du fait des très faibles teneurs en nitrates dans la nappe ;
- l'expérimentation sur tranchées filtrantes de façon à estimer la cinétique et la répartition spatiale du colmatage.

BIBLIOGRAPHIE

- AUROSSEAU, 1988.- Etude du phytoplancton des deux plans d'eau de la boucle de Poses-le-Vandreuil, 1986-1987, 50 p.
- BRGM, 1986.- Examen des aspects thermiques liés à la présence des gravières en eau dans les formations alluvionnaires. Note technique, 5 p.
- CAUDRON, DESPREZ, PEAUDECERF, 1970.- Etude hydrogéologique du Val d'Orléans. Observations piézométriques. BRGM 70 SGN 101.
- CAUDRON, ALBINET, COTTEZ, MARGAT, 1965.- Les sources du Loiret, guide hydrogéologique. Bull. BRGM 3-1965, p. 184-203.
- DARMANDRAIL D., 1986.- Colmatage et effet filtre des berges lors de l'alimentation des nappes alluviales par les cours d'eau. Synthèse bibliographique. BRGM 86 SGN 371 EAU, 75 p., 53 fig., 9 tab., 7 ann.
- DARMANDRAIL D., 1987.- Filtration géochimique de métaux lors de leur transfert d'une rivière vers une nappe alluviale, application à la nappe des alluvions du Rhône (69) et de la Deule (59). Thèse 3ème cycle, Université de Bordeaux III, 450 p.
- DARMANDRAIL D., 1988.- Processus géochimiques susceptibles d'être impliqués dans l'effet filtre des berges lors de l'alimentation des nappes par les cours d'eau. In : Hydrogéologie n° 3, 1988, p. 187-196, 8 fig., 1 tab.
- DURBEC A., MUNTZER P., ZILLIOX L., 1986.- Visualisation par thermographie aérienne des échanges hydrodynamiques entre la nappe phréatique, les cours d'eau et les gravières dans la plaine du Rhin au Nord de Strasbourg. In : Bull. SFPT n° 102, p. 25-36.
- EBERENTZ P., RINCK G., 1987.- Impact qualitatif des carrières en eau sur les nappes souterraines. Rapport de synthèse, BRGM 87 SGN 567 HNO-ALS, 25 p.
- GARNIER J.L., HENRY J.L., 1979.- Préservation des ressources en eau de la plaine du Var. Etude des relations Var-nappe au droit de la Souille 4-5. Etude du colmatage par l'observation d'une crue. BRGM, DDE 04, Géo-Hydraulique, 32 p. + annexes.
- GRAVOST M., SIGONNEAU J.M., 1988.- Interactions entre les carrières et les eaux souterraines et superficielles. Bilan des connaissances techniques. BRGM 87 SGN 391 PAC, 61 p. + annexes.
- GURLIAT G., 1988.- Impact de la mise en chômage de la Meuse sur la nappe alluviale. BRGM 88 SGN 328 CHA.

*Etude du colmatage et de sa cinétique de formation à l'interface
gravière/nappe - SRETIE*

- LELONG F., LIVROZET E., VERMOREL P., 1988.- Etude hydrochimique des eaux de la plaine alluviale de Poses-Val de Reuil (Eure), Université d'Orléans, 47 p.
- ROUSSELOT, 1989.- Etude préliminaire à l'implantation d'une station d'alerte sur la Loire en vue de la protection des captages du Val d'Orléans (45). BRGM 89 SGN 503 CEN.
- Service Hydrologique Centralisateur du Bassin Loire-Bretagne, 1988.- La Loire dans la traversée du département du Loiret. Altitudes des lignes d'eau correspondant à des débits caractéristiques de crues et d'étiages.
- SINOQUET, 1987.- Impacts d'une ballastière en eau sur la qualité des eaux souterraines. Cas de deux ballastières alsaciennes et modélisation mathématique appliquée aux échanges hydrochimiques et hydrothermiques. Thèse de 3ème cycle, Université Louis Pasteur de Strasbourg, 239 p.
- SINOQUET, ACKERER, ZILLIOX, 1988.- Contribution à la modélisation mathématique en hydrothermie à la quantification du degré de colmatage de la berge aval d'une gravière. Cas d'une ballastière abandonnée située en aquifère rhénan alsacien. In : Hydrogéologie 1988, n° 3.
- SUAIS M.F., DARMANDRAIL D., BOURG A., 1987.- Programme de recherche sur l'effet filtre. Etude sur le site de Crépieux-Charny (Rhône). Synthèse des travaux effectués depuis 1985. BRGM 87 SGN 147 RHA.

